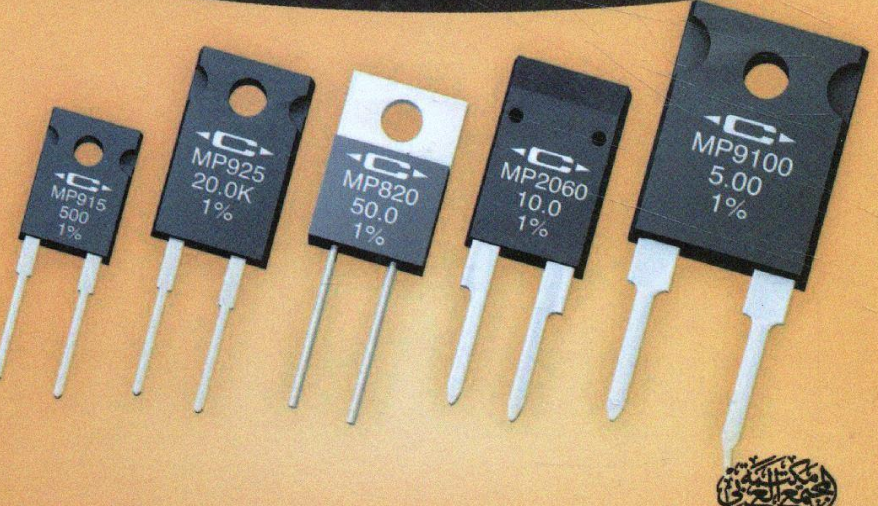
إلكترونيات القدرة

Power Electronics

المهندس
غازي محمد القريوتي
المهندس
زيد بولص الحجازين
المهندس
معن توفيق حدادين
المهندس
أحمد يوسف قنديل



مكتبة المجتمع العربي
للنشر والتوزيع

إلكترونيات القدرة
Power Electronics

إلكترونيات القدرة

Power Electronics

تاليف

م. غازي محمد القريوتي   م. معن توفيق حدادين

م. زيد بولص الحجازين   م. أحمد يوسف قنديل

الطبعة الثانية

2014م – 1435هـ

مكتبة المجتمع العربي

مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع

المملكة الأردنية الهاشمية

رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية (2008/7/2961)

621.381

الكترونيات القدرة = Power Electronics/ غازي محمد القريوتي..وآخرون.- عمان: مكتبة المجتمع .2008

( ) ص

ر.إ. : 2008/7/2961

الواصفات: الالكترونيات /

- أعدت دائرة المكتبة الوطنية بيانات الفهرسة والتصنيف الأولية

الطبعة العربية الثانية

2014م – 1435هـ

مكتبة المجتمع العربي

مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع

عمان – وسط البلد – ش. السلط – مجمع الفحيص التجاري

تلفاكس 4632739 ص.ب. 8244 عمان 11121 الأردن

عمان – ش. الملكة رانيا العبد الله – مقابل كلية الزراعة –

مجمع زهدي حصوة التجاري

www: muj-arabi-pub.com

Email: Moj_pub@hotmail.com

الفهرس

المحتويات **رقم الصفحة**

الوحدة الاولى

نظام الكترونيات القدرة

الوحدة الثانية

دوائر التقويم باستخدام الديودات

المحتويات	رقم الصفحة

المحتويات رقم الصفحة

الوحدة الثالثة

الثايروستور

المحتويات	رقم الصفحة

الوحدة الرابعة

دوائر التقويم باستخدام الثايرستور

المحتويات	رقم الصفحة

الوحدة الخامسة

متحكمات الجهد المتناوب

المحتويات رقم الصفحة

الوحدة السادسة

المقطعات

الوحدة السابعة

العاكسات

المحتويات	رقم الصفحة

الوحدة الثامنة

المفاتيح الاستاتية

المحتويات	رقم الصفحة

المقدمـــــــــــة

تعتبر الكترونيات القدرة من أهم الحلقات الرئيســية فــي علــم الهندســة الكهربائية. أذ انها تمثل علاقة الربط بين مدخل أي نظام ومخرجة. وقد أصــبحت عناصر الكترونيات القدرة موجودة في الكثير من الأجهزة المستخدمة في الصناعة، وذلك لقابليتها على تحمل القدرات العالية وكفائتها العالية في أنظمة تحويل القدرة. وتكمن أهمية الكترونيات القدرة في أهمية الآلة، حيث تمكنا بالاعتماد علــى هــذه العناصر من التحكم الدقيق في سرعات المحركات الحثية ومحركات التيار المباشر، وعلى سبيل المثال التحكم في السرعة والتوقف الدقيق للمصعد الكهربائي.

لا يمكن في هذه المقدمة البسيطة التطرق الى جميع الآليات والاجهزة التي تتعامل معها عناصر الكترونيات القدرة، إلا أنه يمكننا القول أن إســتخدامها فــي عصرنا [illegible] كبير جداً، وأصبحت من العناصر التي لا يمكن [illegible] وخاصة في عالم الصناعة.

أن الغرض من تأليف هذا الكتاب بصورة رئيسية [illegible] وعوناً لطلبة كليات الهندسة، أو للطلبة المختصين في مجال الاكترونيات الصناعية، أو للمهندسين المهتمين في عالم الصناعة. وذلك من أجل تزويــدهم بالمعلومــات العلمية وطرق تحليلها وتصميمها. ومن أجل فهم المادة المدونة في هــذا الكتــاب يفترض في القارىء أن يكون ملماً بأساســيات الــدوائر الكهربائيــة وبأساســيات الإلكترونيات.

يحتوي هذا الكتاب على مواضيع مختلفة، وقد تم ترتيب هذه المواضيع قدر الامكان، بحيث تكون متسلسلة ومتكاملة. وقد تم تخصيص وحــدة خاصــة لكــل موضوع تشمل شرح الظواهر الفيزيائية والتحليلات الرياضية الدقيقــة والامثلــة. ويتألف الكتاب من ثماني وحدات وزعت كما يلي:-

الوحدة الأولى:- تم التطرق في هذه الوحدة الـــى التطبيقـــات العمليـــة لعناصـــر الكترونيات القدرة وانواعها. وكذلك الامر الى تحليل لاشباة الموصـــلات الـــديود والترانزستور.

الوحدة الثانية:- في هذه الوحدة تم التعرف على جميع الاحمال مع مفاتيح في حالة التيار المتناوب والمستمر. وبعدها تم إدخال الديود والتعرف الى تحليلات فـــورير. ثم انتقلنا الى دوائر التقويم أحادية وثلاثية الطور بأحمال مختلفة.

الوحدة الثالثة:- هنا تكلمنا بإيجاز عن الثايرستور وعائلتة وخواصه، وعن طـــرق قدح وأطفاء الثايرستور. وكذلك عن طرق فحص الثايرستور والترياك والدياك.

الوحدة الرابعة:- في هذه الوحدة تكلمنا بإيجاز عن المقومات المحكومـــة أحاديـــة وثلاثية الطور بإحمال مختلفة وعن طرق تصميمها.

الوحدة الخامسة:- في هذه الوحدة كان لا بد من أكمال موضوع الثايرستور ولكن بطريقة حاكمات الجهد، حيث تم التطرق الى حاكمات الجهد أحادية وثلاثية الطور بإحمال مختلفة.

الوحدة السادسة:- هنا انتقلنا الى موضوع جديد وهو ما يسمى بالمقطعات، حيـــث تم التطرق الى موضع المقطع بشكل تفصيلي بجميع أصنافه.

الوحدة السابعة:- في هذه الوحدة تم التعرف على العاكس، الذي يقوم بتحول القدرة من تيار مباشر الى تيار متناوب بجميع أنواعة أحادية الطور وثلاثية الطور.

الوحدة الثامنة:- في هذه الوحدة تم التطرق الى مفاتيح القدرة الكهربائية الاستاتية، مفاتيح كهروميكانيكية، مفاتيح ثابتة، والمفاتيح الالكترونية.

المؤلفون

الوحدة الأولى

نظام الكترونيات
القدرة

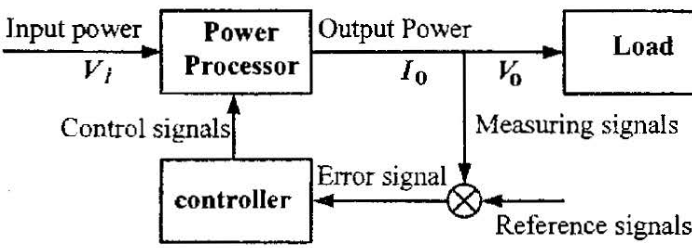
الوحدة الأولى

نظام الكترونيات القدرة

Power Electronic System

مقدمة:

منذ القدم تم إستخدم نظام إلكترونيات القدرة في إنتاج والتحكم بتدفق القدرة الكهربائية، وذلك بتطبيق الجهد والتيار المناسبين من أجل حمل معين. ويبين الشكل (١-١) المخطط الصندوقي لنظام الكترونيات القدرة.



شكل (١-١)

المخطط الصندوقي لنظام الكترونيات القدرة

قدرة الدخل تحتوي على جهد وتيار وزاوية فرق طور بين الجهد والتيار وتردد من $(50 \rightarrow 60)Hz$، وقدرة الخرج تحتوي على جهد وتيار وزاوية فرق طور وتردد يتفق مع متطلبات الحمل.

يوجد في هذا النظام نظام تغذية عكسية متحكم به يقوم بمراقبة المخرج والتحكم به عند القيمة المطلوبة الموافقة لمتطلبات الحمل وذلك بشكل مستمر. في السنوات السابقة تم تطوير نظام الكترونيات القدرة من حيث استخدام دوائر منطقية خطية في التحكم أو من خلال استخدام أجهزة التحكم الرقمية، وكذلك التطور في

تصنيع أنصاف النواقل من حيث النوعية وسرعة الإستجابة ومقدار التيار المار من خلال هذه العناصر.

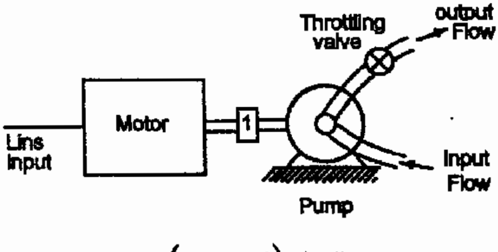
١-١- تطبيقات نظام الكترونيات القدرة

إن تطور نظام الكترونيات القدرة يمكن عزيه إلى التطبيقات التالية:-

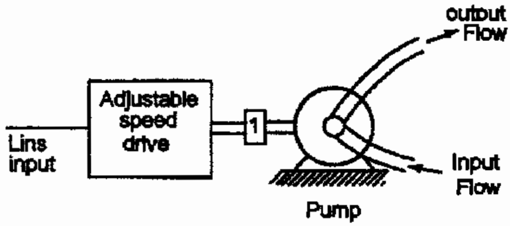
١- خواص الفصل والوصل لمصادر القدرة المستمرة:- تطور تصنيع أنصاف النواقل أدت إلى تطوير أجهزة الكمبيوتر والأجهزة الكهربائية الأخرى، حيث يتطلب عملها المحافظة على جهد مستمر منتظم.

٢- المحافظة على القدرة (التوفير في استخدام القدرة) (Energy Consumption) :- استخدام الكترونيات القدرة يؤدي إلى تقليل الاستهلاك في القدرة، وخاصة عند استخدام عناصر الكترونيات القدرة في اللمبات الفلورسنتية ذات الترددات العالية (أكبر من 20 KHz) وكذلك استخدام الكترونيات القدرة في المضخات والكمبروسورات.

في النظام المبين في الشكل (١-٢-a) فإن المضخة تعمل بسرعة ثابتة يتم التحكم بمقدار التدفق عن طريق المحبس، وهذه الحالة تمثل خسارة في القدرة الكهربائية لأن استهلاك القدرة يبقى ثابتاً مهما اختلف مقدار التدفق من خلال المحبس.



الشكل $(a-2-1)$



الشكل $(b-2-1)$

ولكن عند استخدام نظام الكترونيات القدرة كما في الشكل (١-٢-b)، فإن استهلاك القدرة سوف يقل عند استخدام نظام قدرة متغير للتحكم بسرعة المحرك في المضخة مما يتوافق مع متطلبات التدفق للمخرج.

وكذلك التحكم في أنظمة التكييف بما يتوافق مع متطلبات الحمل مثال على التوفير في استهلاك القدرة الكهربائية.

٣- عملية التحكم والقيادة الآلية للمصانع:- هنالك حاجة كبرى إلى محركات متحكم في سرعاتها وذلك في العمليات الصناعية المختلفة، وكذلك استخدام الإنسان الآلي في كثير من المصانع الكبيرة.

٤- عمليات النقل:- في كثير من الدول المتقدمة يستخدم القطار الكهربائي في عمليات النقل بين المناطق المختلفة لتلك الدول، ويجرى التحضير لاستخدام ناقلات كهربائية من أجل نقل البضائع.

وفيما يلي بعض تطبيقات الكترونيات القدرة في كثير من المجالات:-

أ- الاستخدامات المنزلية (Residential):- أجهزة التبريد، التدفئة والتكييف، الطبخ والإنارة، وأجهزة الكمبيوتر.

ب- تجاريا (Commercial):- أجهزة التدفئة والتكييف وأجهزة التبريد المركزية والإنارة وأجهزة الكمبيوتر والأجهزة المكتبية ومزودات القدرة (UPS) (Uninterruptible Power Supply).

ج- صناعيا (Industrial):- المضخات، الكمبريسرات والمراوح وأجهزة اللحــام وأجهزة الإنارة.

د- النقل (Transportation):- الناقلات الكهربائية، أجهزة الشحن الكهربائية.

هـ- الخدمات (Utility System):- البث باستخدام جهد مستمر مرتفع، المضخات الكهربائية ذات القدرات العالية، أجهزة تزويد القدرة والمراوح المركزية.

و- الفضاء (Aerospace):- نظام تزويد القدرة للمركبات الفضائية، نظام التغذيــة لأجهزة الستالايت، أجهزة الاتصالات.

ز- الاتصالات (Telecommunications):- شواحن البطاريات، مصادر القــدرة (Ac, Dc).

٥- التطبيقات التقنية (Electro-technical):- وتشمل أجهــزة اللحــام ومــزودات القدرة.

٦- تطبيقات النقل (Utility-related application):- من أحد التطبيقات الهامة نقل القدرة باستخدام الجهد المرتفع. في بداية خط النقل يحول الجهد المتناوب إلى جهد (Dc) وعند نهاية الخط يتم تحويل الجهد إلى (Ac) بتردد معــين مــرة أخرى.

١-٢- تصنيف الكترونيات القدرة والمحولات

Classification of power electronic and converters

١- الكترونيات القدرة (Power electronic):- من أجل دراسة تصنيف الكترونيات القدرة من المفيد التعرف على نظام القدرة في نظام الكترونيات القدرة.

في معظم أنظمة الكترونيات القدرة فإن نظام الدخل يمثل مــصدر التغذيــة المتوفر وجهد المخرج يمكن أن يكون أحد الأشكال التالية:-

١- جهد مستمر (DC) ويمكن أن يكون احد الأشكال التالية:-

أ. منتظم (ذو قيم ثابتة) (Regulated magnitude).

ب. قيمة متحكم بها. (Adjustable magnitude).

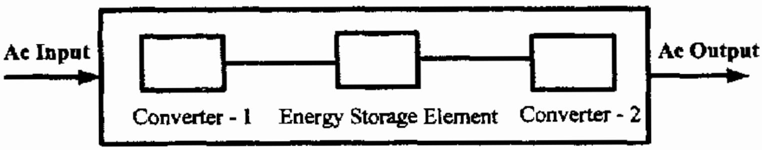
٢- جهد متناوب (AC) ويمكن أن يكون احد الأشكال التالية:-

أ- إما أن يكون ذو تردد ثابت وقيم يتحكم بها.

ب- إما أن يكون ذو تردد متحكم به وقيم متحكم بها.

ويكون جهد المدخل وجهد المخرج مستقلين عن بعضهما البعض وفي بعض الحالات الخاصة يمكن أن يكون جهد المدخل هو نفس جهد المخرج.

٣- محولات القدرة (Power Converters):- حيث أنه ليس بالضرورة أن تكون قدرة الدخل مساوية إلى قدرة الخرج، وإنما يتم تحويل قيم هذه القدرة حسب متطلبات الحمل, وباستخدام محولات القدرة مثل عناصر المكثفات والملفات. الشكل (١-٣) يبين المخطط الصندوقي لمحول القدرة.



Power Processor block-diagram

الشكل (١-٣)

المخطط الصندوقي لمحول القدرة

يتألف محول القدرة من عناصر شبه موصلة متحكم بها بعناصر إلكترونية وعناصر تخزين مثل المكثفات والملفات.

ويمكن تصنيف محولات القدرة إلى الأصناف الرئيسية التالية:-

١- $Ac \to Dc$ (المقومات) باستخدام الديودات .

٢- $Ac \to Dc$ (المقومات المحكومة) باستخدام الثايروستورات.

٣- $Dc \to Ac$ (العاكسات) .

٤- $Dc \to Dc$ (المقطعات).

٥- $Ac \to Ac$ (حاكمات الجهد).

٦- مفاتيح أستاتية (Static Switches).

سوف نقوم باستخدام مصطلح (Converter) محول القدرة كمصطلح عام للدلالة إلى تحويل مرحلة واحدة من أنواع التحويل المذكورة سابقا. وحتى نكون أكثر تحديدا في هذا التعريف فإنه يعرف التحويل من $(Ac \to Dc)$ بالتقويم (Rectification). والتحويل من $(Dc \to Ac)$ بالعاكس (Inverter).

وكمثال في المخطط الصندوقي المبين في الشكل (١-٣)، إذا كان جهد المدخل هو جهد (Ac) فإن المحول الأول سوف يحول من (Ac) إلى (Dc) وهو بالتالي يعمل كمقوم، ويتم تخزين القدرة الناتجة في عناصر التخزين، ومن ثم يستم نقل هذه القدرة إلى المحول التالي الذي يعمل كعاكس حيث يقوم بتحويل القدرة من (DC)إلى (Ac).

ويمكن تقسيم المحولات من حيث التوقف عن العمل إلى الأقسام الرئيسة التالية:-

١- توقف طبيعي عن التوصيل (Naturally-Commutated Converter):- في هذا الوضع يتم التحكم بالمخرج حسب إشارة المدخل .

٢- توقف إجباري عن التوصيل (Forced-Commutated Converters):- في هذه الحالة يتم التحكم في جهد المخرج بواسطة تردد أعلى بكثير من تردد المدخل.

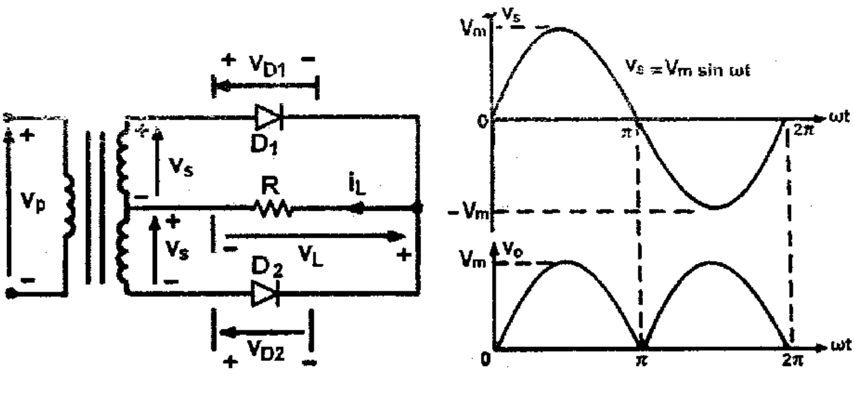
٣- محولات الرنين (Resonant and Quasi- Resonant Converters):-

حيث يتم التحويل إلى حالة القطع أو الوصل عند جهد يساوي الصفر أو تيار يساوي الصفر.

١-٣- أنواع دوائر الكترونيات القدرة :-

كما ورد في التحليل السابق لأنواع المحولات والعاكسات ، فإنه يمكن تصنيف دوائر الكترونيات القدرة إلى الأقسام الرئيسية التالية:-

١- دوائر تقويم باستخدام الديودات:- وهي دوائر تقويم تحتوي على الديودات تقوم بتحويل جهد (Ac) إلى جهد (Dc) ثابت. والشكل (١-٤) يبين إحدى هذه الدوائر. ويمكن أن يكون جهد المدخل أحادي الطور أو ثلاثي الأطوار.

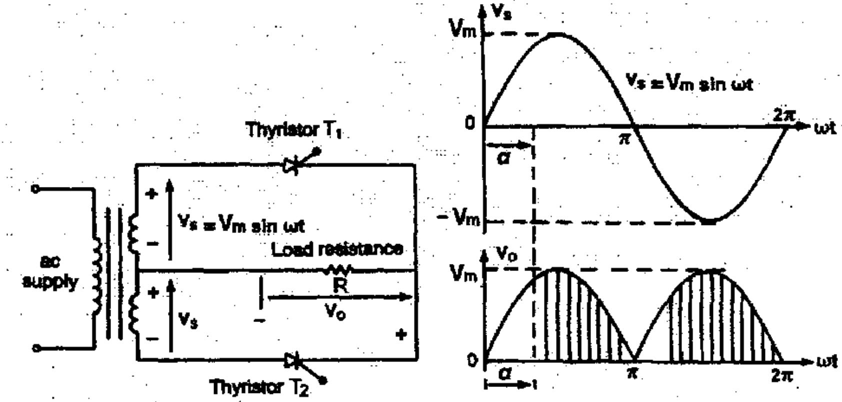


الشكل (١-٤)

دائرة تقويم باستخدام الديودات وشكل الإشارة الخارجة

٢- دوائر تحويل من (Ac) إلى (Dc) محكومة:- تستخدم دوائر تقويم متحكم بها وتستخدم الثايروستورات لهذه الغاية. والشكل (١-٥) يبين دائرة محول قدرة أحادي الطور مكون من ثايروستورين، يتم في هذا النوع من الدوائر

التحكم بالجهد المقوم عن طريق تغيير زاوية القدح للثايرستورات، ويمكن أن يكون جهد الدخل أحادي الطور أو ثلاثي الأطوار.

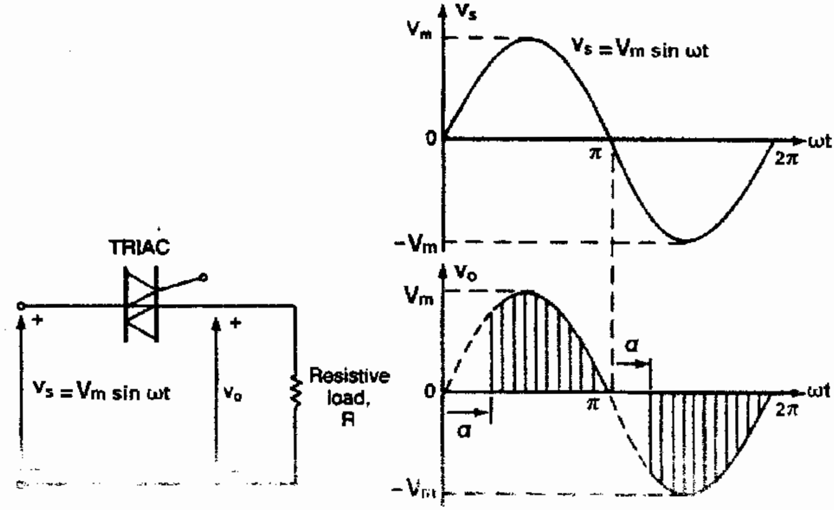


الشكل (١-٥)

دائرة تقويم باستخدام الثايرستور وشكل الإشارة الخارجة

٣- دوائر تحويل $(Ac \rightarrow Ac)$ $(Ac \rightarrow Ac\ Converter)$:- وهي دوائر تحكم بالجهد (Ac). تستخدم هذه الدوائر من اجل الحصول على جهد خرج (Ac) متغير من مصدر جهد (Ac) ثابت. ويستخدم الترياك لهذه الغاية. كما يبين الشكل (١-٦) إحدى الدوائر المستخدمة لهذا المحول.

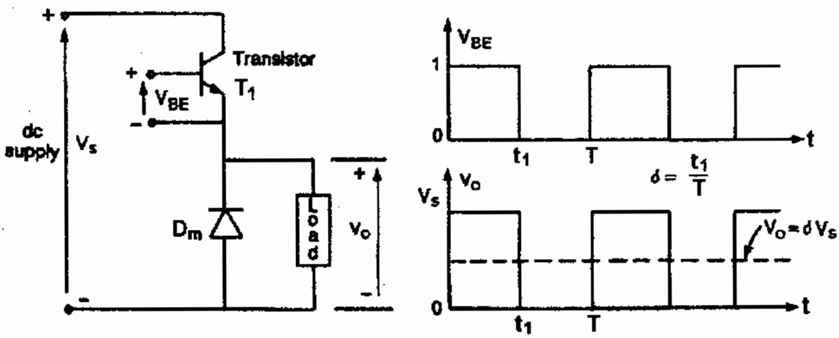
ويتم التحكم بجهد الخرج عن طريق زاوية القدح (α) للترياك وتسمى هذه المحولات بمتحكمات الجهد $(Ac\ Voltage\ Controllers)$.



الشكل (١-٦)

دائرة ترياك للتحويل من ($Ac \rightarrow Ac$)

٤- محولات من ($Dc \rightarrow Dc$) وهي دوائر التقطيع (*Dc Chopper*):- ويبين الشكل (١-٧) دائرة مقطع ترانزوستورية.



الشكل (١-٧)

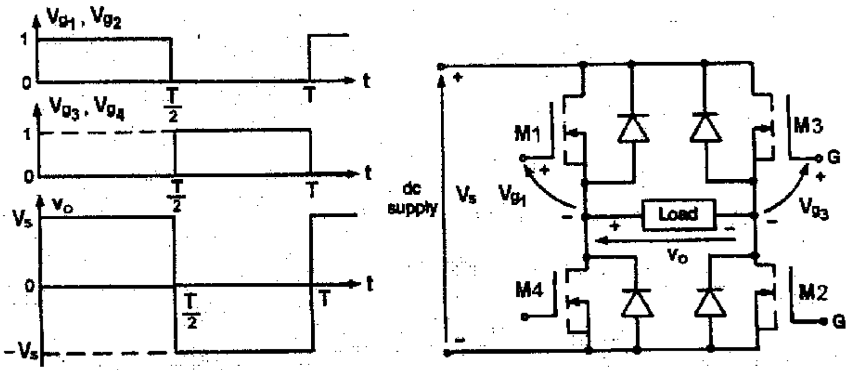
دائرة مقطع ترانزوستورية

ويتم التحكم بالقيمة المتوسطة لجهد المخرج عن طريق تغيير زمن التوصيل (t) للترانزيستور (T_1).

إذا كان (T) الزمن الدوري فإن زمن التوصيل $(t_1 = \sigma.T)$

حيث أن (σ)هي (Duty Cycle) للمقطع.

٥- محولات من $(Dc \rightarrow Ac)$ وهو ما يدعى بالعاكس (Inverter). يبين الشكل (١-٨) دائرة عاكس أحادي الطور.إذا كان الترانزستورين $(M1)$و $(M2)$ موصولين خلال نصف موجة, والترانزستورين $(M3)$ و$(M4)$ موصولين خلال النصف الآخر من الموجة فإن جهد المخرج يتغير مع الزمن، ويمكن التحكم بجهد المخرج بتغيير زمن التوصيل للترانزستورات.



الشكل (١-٨)

دائرة عاكس أحادي الطور

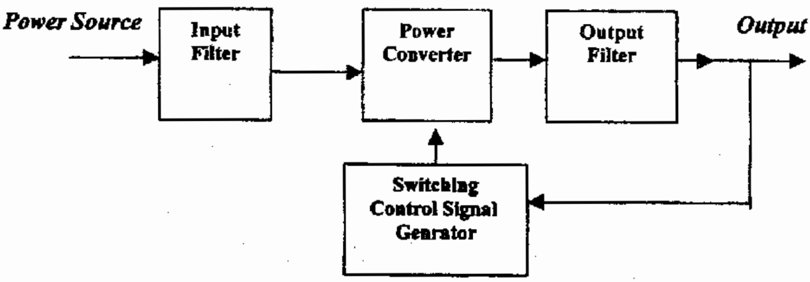
٦- المفاتيح الأستاتية (Static Switches) :- بما أن عنصر القدرة يمكن أن يعمل كمفتاح إستاتي أو كونتاكتور فإن تغذية هذه المفاتيح يمكن أن تكون (Ac) أو (Dc)، وتسمى هذه المفاتيح مفاتيح إستاتية (Ac) أو مفاتيح إستاتية (Dc).

إن عملية الفصل والوصل للعناصر المكونة لأحد المحولات السابقة يمكن أن يتم بأكثر من مرحلة. واختيار أي نوع من المحولات السابقة يعتمد على قيمة الجهد والتيار وسرعة الفصل والوصل للعناصر المكونة للمحول.

١-٤- الآثار الجانبية لمحولات القدرة

عمل محولات القدرة يعتمد بشكل أساسي على عملية فصل أو وصل أشباه الموصلات وهذا يؤدي إلى وجود توافقيات في دوائر الدخل ودوائر الخرج وكذلك إلى وجود تشويش في دوائر الخرج. وبالتالي لا بد من وجود فلاتر في دوائر الدخل ودوائر الخرج من أجل التقليل من هذه التوافقيات والتشويش في إشارات المخرج.

والشكل (١-٩) يبين المخطط الصندوقي لمحول قدرة يستخدم الفلاتر من أجل هذه الغاية. مدخل ومخرج المحول يمكن أن يكون (Ac) أو (Dc).



الشكل (١-٩)

المخطط الصندوقي لمحول قدرة

يتم التأكد من موافقة الإشارة الخارجة من المحول لمتطلبات الحمل من خلال تحديد قيم بعض المعاملات المستخدمة لهذه الغاية:-

١- معامل التشويش الكلي (Total Harmonic Distortion) (THD).

٢- معامل الإزاحة (Displacement Factor) (DF).

٣- معامل القدرة لدائرة الدخل ((IPF) Input Power Factor).

ملخص بعض المفاهيم الكهربائية والمغناطيسية:- الهدف من هذه الفقرة هو:-

١- التركيز على بعض التعريفات الأساسية التي تستخدم في الكترونيات القدرة.

٢- إعطاء صورة مبسطة عن تطور الكترونيات القدرة .

يتم اعتماد التصنيف العام (SI) في الدوائر الكهربائية، لذلك تستخدم الأحرف الصغيرة لبيان الكميات المتغيرة مع الزمن، وتستخدم الأحرف الكبيرة لبيان القيم المتوسطة، بيان اتجاه سريان التيار يتم باستخدام سهم واضح وكبير دائما يكون منسوبا إلى الأرضي.

فرق الجهد بين نقطتين:-

$$V_{ab} = V_a - V_b \qquad (1.1)$$

الحالة الثابتة (Steady State):- في الكترونيات [illegible] وأشباه الموصلات تغير وضعها من (ON) إلى (OFF)، ولذلك يطرح السؤال متى تصبح الدائرة في الحالة الثابتة؟

يتم الوصول إلى الحالة الثابتة عندما يتوافق شكل الموجة مع الفترة الزمنية (T).

القيمة اللحظية للقدرة:-

$$P(t) = v.i \qquad (1.2)$$

كل من التيار والجهد يمكن أن يكون متغير مع الزمن، إذا كانت موجة الجهد والتيار تتوافق مع الزمن الدوري في الحالة الثابتة فان القدرة المتوسطة تعطى بالعلاقة:-

$$P_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T P(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^T v.i\ dt \qquad (1.3)$$

إذا كانت الدائرة تتكون من حمل مادي فإن $(v = R.i)$ وتصبح علاقة القدرة المتوسطة:-

$$P_{av} = R\frac{1}{T}\int_{0}^{T} i^2\, dt \qquad (1.4)$$

باستخدام القيمة المتوسطة للتيار:-

$$P_{av} = R.I^2 \Rightarrow I^2 = \frac{P_{av}}{R} \qquad (1.5)$$

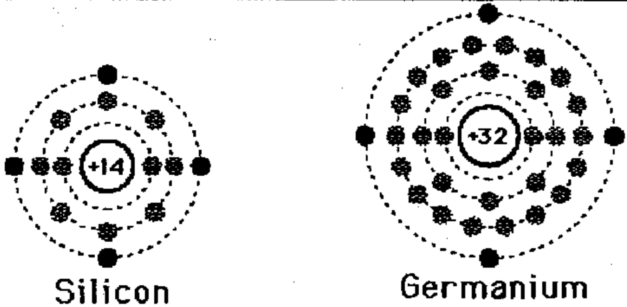
١-٥- أشباه الموصلات والديودات:-

مقدمة:-

أشباه الموصلات كما هو واضح من إسمها هي مواد لا يمكن اعتبارها مواد موصلة وكذلك لا يمكن اعتبارها مواد عازلة. وتستخدم من اجل صناعة عناصر الكترونية مثل الديودات أو الترانزستورات أو الثايرستورات والتي تستخدم بشكل أساسي من اجل التحكم بالتيار أو الجهد. والعناصر المصنوعة من أشباه الموصلات تعزى إلى مكونات (Solid State) لأنها تصنع من عناصر (Solid) وهذه العناصر لن تقوم بتوصيل التيار كما هو الحال في المواد الموصلة، وكذلك فإنها لن تمنع بدورها مرور التيار كما هو الحال في المواد العازلة. إن السيليكون والجرمانيوم والكربون هي عناصر شبه موصلة للتيار.

١-٥-١- التركيب الكيميائي لمادة السيليكون ومادة الجرمانيوم:-

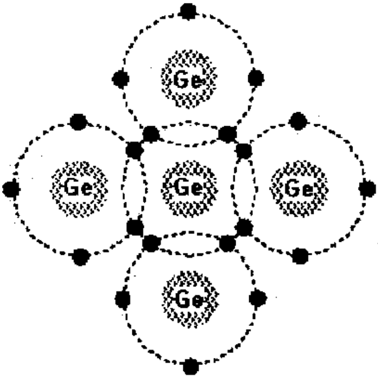
ذرة الجرمانيوم يوجد بداخل نواتها (٣٢) بروتون و (٣٢) إلكترون، تدور حول النواة ضمن أربعة مدارات المدار الأول (٢) والمدار الثاني (٨) والمدار الثالث (١٨) والمدار الرابع (٤) إلكترونات حرة تدعى الكترونات التكافؤ. ذرة السيليكون يوجد بداخل نواتها (١٤) بروتون و(١٤) إلكترون موزعة على ثلاثة مدارات المدار الأول (٢) والمدار الثاني (٨) والمدار الثالث (٤) إلكترونات حرة، كما هو مبين في الشكل (١-١٠).



الشكل (١-١٠)

التوزيع الالكتروني لذرة السيليكون والجرمانيوم

إن ذرات الجرمانيوم تشكل تركيب بلوري فيما بينها، حيث تتحد كل ذرة مع أربعة ذرات ضمن روابط تساهمية والتي تعتبر من الروابط القوية لتشكل بلوره، وفي هذه الحالة نجد أن كل ذرة تحتوي على (٤) إلكترونات حرة في مدارها الأخير وبذلك يتم تشكيل بلورة نقية. كما هو مبين في الشكل (١-١١).



الشكل (١-١١)

إتحاد أربع ذرات جرمانيوم مع بعضها البعض لتشكيل بلوره نقية

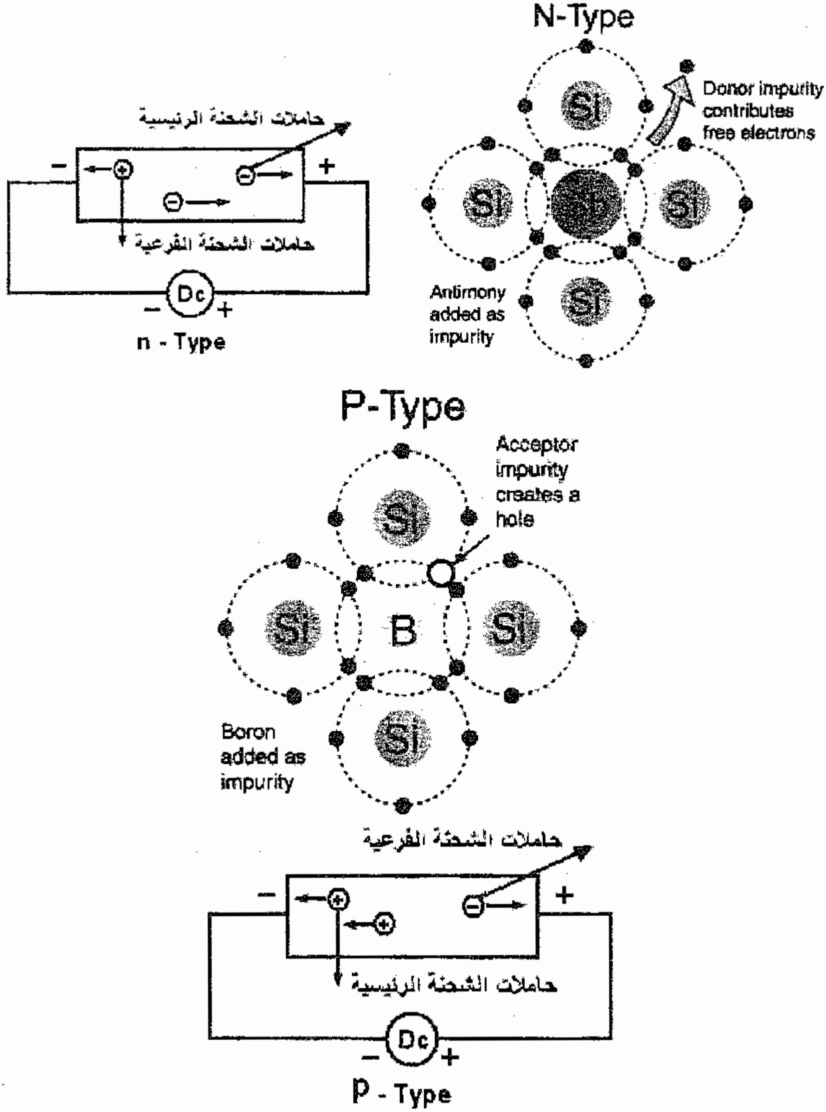
التأثير الحراري:- عند ارتفاع درجة حرارة المحيط بالنسبة للعنصر شبه الموصل فإن الالكترونات تستمد طاقتها وتبدأ بالتحرك بسرعة اكبر مما يؤدي إلى إنتاج

حرارة نتيجة الاصطدام الأسرع للإلكترونات مع بعضها البعض مما يؤدي إلى خروج بعض الإلكترونات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل وهذا يؤدي إلى توليد فجوة في التركيب البلوري، حيث أن هذه الفجوة سوف تملأ بإلكترون آخر. (عند درجات الحرارة المنخفضة فان الإلكترونات الحرة المنطلقة من المدار الخارجي للذرات تكون معدودة وبالتالي يتصرف العنصر كعازل).وعند درجات الحرارة العالية فانه نتيجة الحركة السريعة للإلكترونات فان الإلكترونات تنطلق من مداراتها مخلفة خلفها فجوات والتي بدورها سوف تملأ بإلكترونات حرة من الإلكترونات الطليقة التي تركت مدارها وفي هذه الحالة فإن العنصر الشبه الموصل يصبح موصلاً.

الوضع الأساسي:- عند تطبيق جهد على طرفي شبه موصل نقي، فإن مرور التيار خلال شبه الموصل يعتمد على درجة حرارة الوسط المحيط، فإذا كانت درجة الحرارة منخفضة فان عدد الإلكترونات الحرة في هذه الحالة يكون قليلاً وبالتالي تبقى هذه الإلكترونات مقيدة ضمن الذرات الخاصة بها وتعمل على مقاومة الجهد المطبق عليها. ويعمل التركيب البلوري كعازل في هذه الحالة. عند زيادة درجة الحرارة فان الطاقة الحرارية تعمل على توليد أزواج من الإلكترونات والفجوات في شبه الموصل والتي بدورها تحت تأثير الجهد المطبق تعمل على مرور التيار خلال العنصر.إن مصدر الجهد المطبق يعمل على تغذية الإلكترونات من القطب السالب وهذه الإلكترونات الحرة تسري خلال شبه الموصل إلى القطب الموجب للمصدر. ضمن شبه الموصل نفسه فإن الإلكترونات الحرة تتنقل بين الذرات إلى الطرف الموجب وبالتالي فإنها تخلف ورائها فجوات تملأ باللإكترونات وهذه الفجوات تتنقل باتجاه الطرف السالب. من ناحية دراسة الفرق بين المواد الموصلة والمواد شبه الموصلة، في المواد الموصلة نهتم فقط بتدفق الإلكترونات الحرة ولكن في المواد

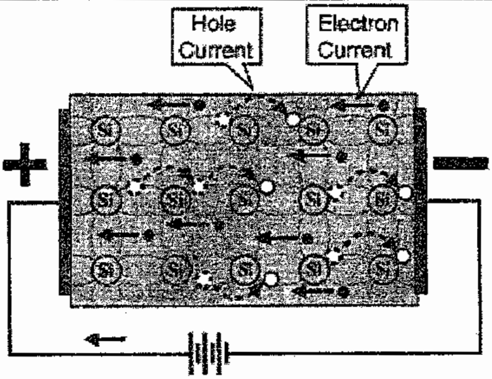
شبه الموصله فإنه يجب أخذ حركة الفجوات بنفس القدر من الأهمية لحركة الإلكترونات الحرة. في ظروف العمل الطبيعية أي ضمن حرارة معتدلة كدرجة حرارة الغرفة ($21^{\circ}C$) فان شبه الموصل لن يمرر كمية كبيرة من التيار ولذلك لا بد من إجراء بعض التعديلات من اجل زيادة تدفق التيار وأيضا زيادة خواص التوصيل لأشباه الموصلات. وتتم هذه التعديلات بإضافة بعض الشوائب إلى أشباه الموصلات النقية من أجل الحصول على طبقات (n)، وطبقات (p)، حيث أن طبقة (n) يتم الحصول عليها بإضافة مادة تقع ضمن العامود الخامس من الجدول الدوري كمادة الفسفور إلى السيليكون من اجل الحصول على تركيب بلوري يحتوي على إلكترون إضافي. ويتم الحصول على طبقة (p) بإضافة مادة تقع ضمن العامود الثالث بالجدول الدوري كمادة الألمنيوم أو البورون الى السيلكون من اجل الحصول على تركيب بلوري، حيث أن المدار الخارجي لذرة السيليكون يحتوي على فجوات بسبب فقدان أحد الإلكترونات، وذلك لإنشاء روابط تساهميه بين الذرات في التركيب البلوري كما هو مبين في الشكل (١-١٢) .عند تطبيق جهد على طرفي طبقة (p) فإن عدد الفجوات الكبير خلال العنصر يعمل على تحريك الإلكترونات من الطرف السالب للمصدر، ويتم الحصول على عدد فجوات اكبر عندما تبدأ الإلكترونات الحرة بترك المسار الخارجي للذرات مما يؤدي إلى زيادة تدفق التيار من خلال العنصر وبالتالي حصول عملية التوصيل. كما هو مبين في الشكل (١-١٣).

كملخص نستطيع القول بان مادة شبه الموصل التي تحتوي على شوائب تتمتع بخواص توصيل أكبر من شبه الموصل النقي. وبزيادة الشوائب في أشباه الموصلات فإن تدفق التيار سوف يزداد وكذلك الموصلية لشبه الموصل، أما المقاومة الكهربائية للموصل فتقل.



الشكل (١-١٢)

حاملات الشحنات في الطبقة (n) والطبقة (P)



الشكل (١-١٣)

تطبيق جهد على شبه موصل نقي

١-٦- عناصر أشباه الموصلات Power Semiconductor Devices

يمكن تصنيف اشباه الموصلات المستخدمة في الكترونيات القدرة إلى ثلاثة مجموعات أساسية :-

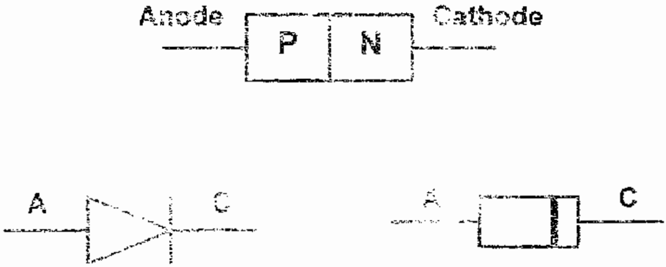
١- الديودات (Diodes):- يتم الحصول على وضع الفصل والوصل متحكم به عن طريق دائرة القدرة.

٢- الثايروستورات (Thyristors):- تتم عملية التوصيل بإشارة متحكم بهـا وتـتم عملية الفصل عن طريق دائرة القدرة.

٣- مفاتيح متحكم بها (Controllable Switches):- يتم التحويل من حالة الفصل أو الوصل عن طريق إشارات تحكم وهي تحتوي على مجموعة كبيرة من عناصر الكترونيات القدرة مثل :-

Bipolar Junction Transistor (BJTs)
Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors (MOSFETs)
Turn off Thyristors (GTO)
Isolated Gate Bipolar Transistors (IGBTs)

١-٦-١-الديود:- عنصر ثنائي الوصلة يتألف من طبقتين (P-N)، كما في الشكل (١-١٤).

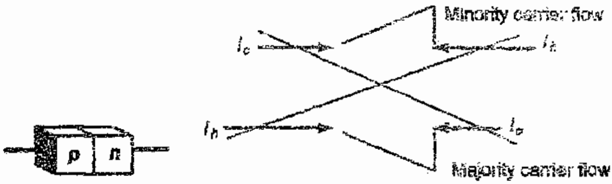


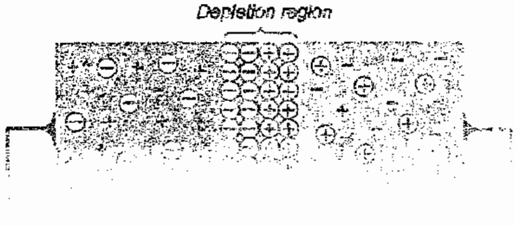
الشكل (١-١٤)
شكل ورمز الديود

انحياز الديود:-

عند تطبيق جهد وجهد حالي طرفي الديود فإن هنالك ثلاثة أوضـــاع لهـــذا الديود وهي كما يلي:-

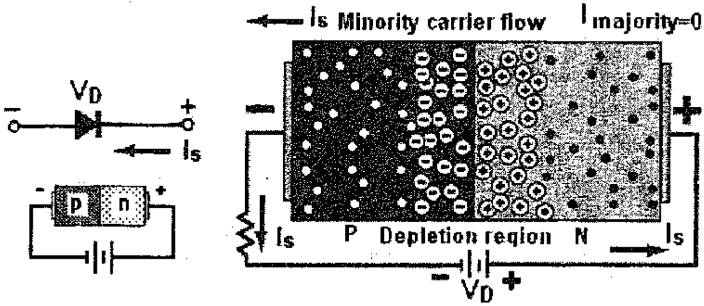
١- **عدم الانحياز** (V_F = 0V):- عندما يكون الجهد المطبق يساوي الصفر أو أقل من جهد الانحياز الأمامي للمادة المصنع منها الديود، في هذه الحالة يبقى الديود في حالة عدم التوصيل وتتحرك حاملات الشحنة السالبة في الطبقة (n) نحو حـــاملات الشحنة الموجبة في الطبقة (p)، بينما تتحرك حاملات الشحنة الموجبة من الطبقـــة (p) نحو حاملات الشحنة السالبة في الطبقة (n) كما هو مبين في الشكل (١-١٥).







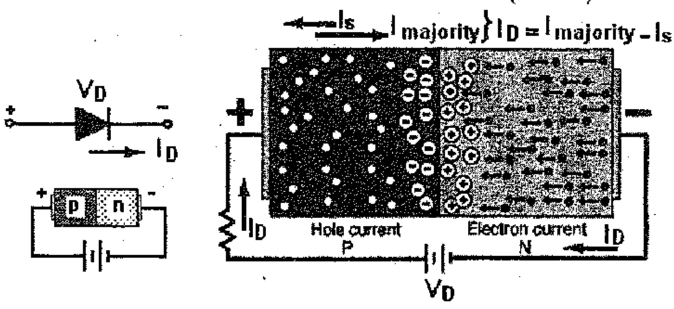
[illegible] الديود على طرفي المصدر [illegible] بتوصيل القطب الموجب للمصدر مع الطرف (n) (السالب) للوصلة، والقطب السالب للمصدر مع الطرف (p) (الموجب) للوصلة فإن هذا الوضع سوف يؤدي إلى زيادة حاملات الشحنة الموجبة من الطبقة (n) وكذلك زيادة حاملات الشحنة من الطبقة (p) مما يؤدي إلى زيادة حاملات الشحنة في الحد الفاصل بين الطبقتين (منطقة الاستنزاف). في هذه الحالة يمر تيار قليل عبر الديود ويعرف بتيار التسريب أو بتيار (I_S)، وهو تيار حاملات الشحنة الأقلية. كما هو مبين في الشكل (١-١٦).



الشكل (١-١٦)

الانحياز العكسي

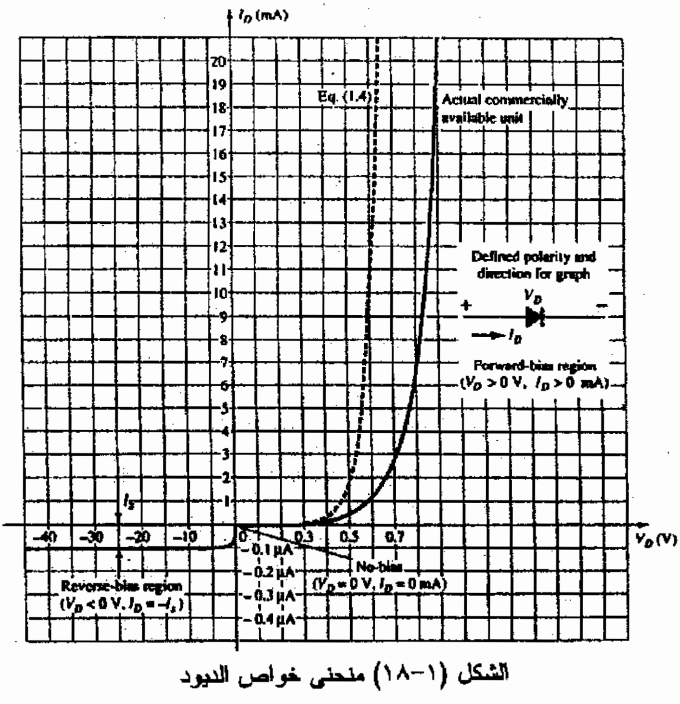
٣- الانحياز الأمامي $(V_D > 0)$:- إذا طبق جهد على طرفي الوصلة (P-N) بحيث يوصل القطب الموجب للمصدر مع الطرف الموجب للوصلة (p) ويوصل القطب السالب للمصدر مع الطرف السالب للوصلة (n). في هذه الحالة تتجه حاملات الشحنة السالبة في الطبقة (p) إلى القطب الموجب وحاملات الشحنة الموجبة في الطبقة (n) نحو القطب السالب مما يؤدي إلى إضعاف الحاجز بين الطبقتين وبالتالي سوف يمر تيار كبير من خلال الديود (تيار حاملات الشحنة الأغلبية) في هذه الحالة يعتمد على قيمة الجهد المطبق وعلى مقاومة الديود $(I_F = \frac{V_F}{R_F})$ كما هو مبين في الشكل (١-١٧).



الشكل (١-١٧) الانحياز الأمامي

خواص الديود (علاقة الجهد مع التيار):-

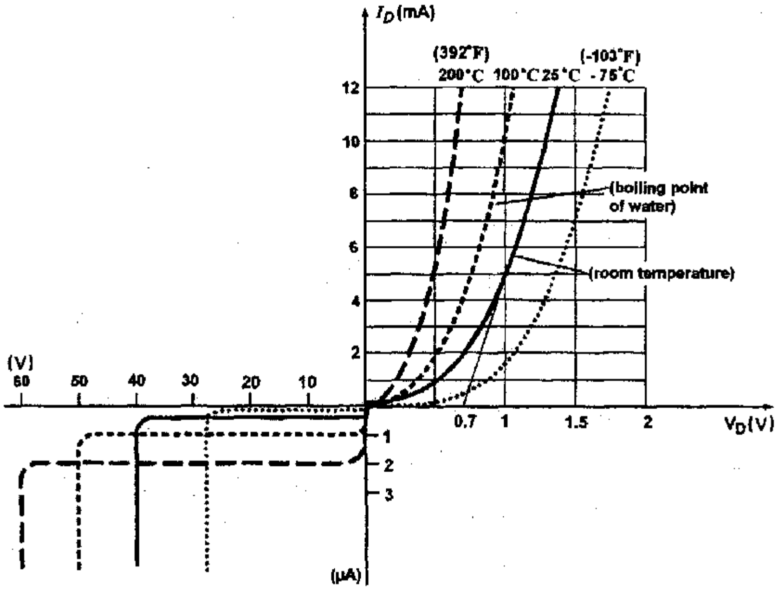
عند وصل القطب الموجب للمصدر مع الطرف الموجب للديود (Anode) والطرف السالب للمصدر مع الطرف السالب للديود (Cathode) ويكون الديود منحازاً انحيازاً أمامياً. وفي حال كون الجهد المطبق اكبر من جهد الانحياز الأمامي للديود فإنه في هذه الحالة يمر التيار العكسي من الطرف الموجب إلى الطرف السالب للديود ويمر التيار الأمامي من الطرف السالب للديود إلى الطرف الموجب. وعند توصيل القطب السالب للمصدر مع الطرف الموجب للديود فإنه في هذه الحالة يكون في حالة الانحياز العكسي ولا يمر من خلال الديود سوى تيار تسريبي قليل بحدود الملي أو الميكرو أمبير وتتناسب قيمة هذا التيار مع الجهد العكسي المطبق.



الشكل (١-١٨) منحنى خواص الديود

منحنى خواص الديود في الحالة الثابتة مبين في الشكل (١-١٨).

إن تيار الانحياز الأمامي يعتمد على كمية الشحنات في الوصلة. وتختلف هذه الخواص باختلاف درجة الحرارة كما هو مبين في الشكل (١-١٩). ويبين الشكل (١-٢٠) خواص الديود من النوع السيلكوني أو الجرمانيوم في الانحياز الأمامي والعكسي.



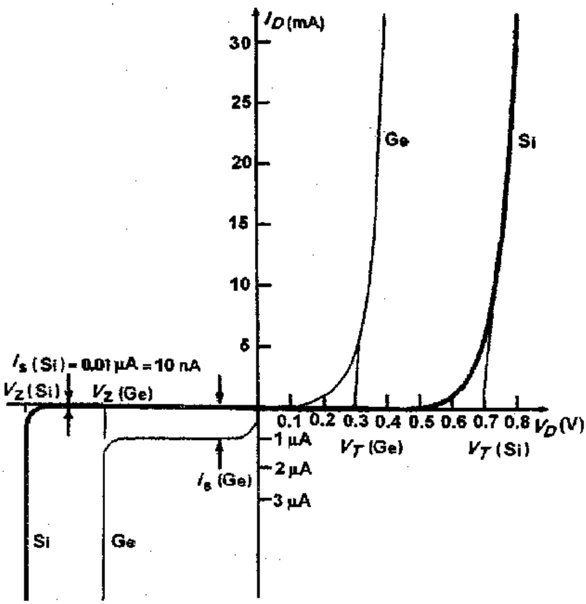
الشكل (١-١٩)

تغير خواص الديود مع تغير درجات الحرارة

إذا كان الديود في حالة التوصيل وقمنا بتقليل تيار الانحياز الأمامي إلى الصفر فإن الديود يتوقف عن التوصيل مباشرة.

أما في حالة العمل الطبيعية أو بتطبيق جهد انحياز عكسي فإن الديود لا يتوقف عن التوصيل مباشرة وإنما سيستمر في التوصيل لفترة معينة نتيجة لوجود حاملات

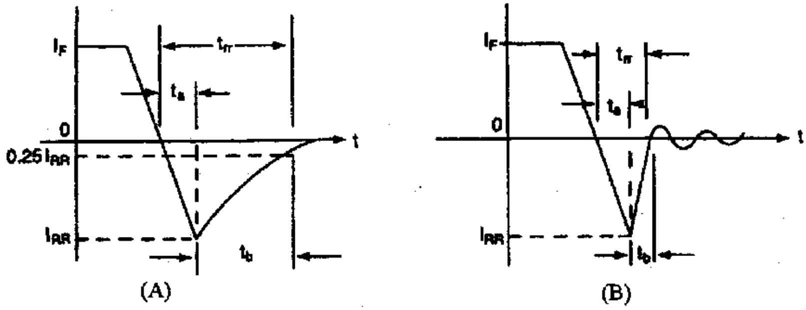
الشحنة في الوصلة (p-n). وهذه الشحنات تحتاج إلى وقت معين حتى تتعادل فيما بينها.



الشكل (١-٢٠)

خواص الديود من النوع السيلكون أو الجرمانيوم في الانحياز الأمامي والعكسي

ويسمى هذا الوقت بـ (t_{rr}) (Reverse Recovery Time) وهو نوعان:- ناعم و حاد، كما هو مبين في الشكل (١-٢١).



الشكل (١-٢١)

الزمن الذي يحتاجه الديود للتوقف A – النوع الحاد B – النوع الناعم

والزمن (t_{rr}) يقاس من نقطة وصول التيار إلى الصفر إلى القيمة التي يصبح فيها التيار $(0.25I_{RR})$ حيث أن (I_{RR}) هو التيار العكسي ألأعظمي ويتألف هذا الـــزمن من جزئيين هما: –

$$t_{rr} = t_a + t_b$$

حيث أن:– (t_a) هو زمن تفريغ جزء الشحنات في الوصلة ويمثل الزمن من نقطة الصفر للتيار إلى القيمة العظمى للتيار العكسي (I_{RR}).

(t_b) :– وهو زمن تفريغ كامل الشحنات.

معامل التنعيم :–

$$Softnees\ Factor(SF) = \frac{t_a}{t_b}$$

القيمة العظمى للتيار العكسي:–

$$Peak\ Reverse\ Current \quad I_{RR} = t_a . \frac{di}{dt}$$

الشحنة المخزونة :–

$$Storage\ Charge \quad Q_{RR} = \frac{1}{2} I_{RR}\, t_a + \frac{1}{2} I_{RR}\, t_b = \frac{1}{2} I_{RR}\, t_{rr}$$

$$I_{RR} = 2\frac{Q_{RR}}{t_{rr}} = t_a . \frac{di}{dt} \quad \Rightarrow t_a . t_{rr} = 2 . \frac{Q_{RR}}{di/dt} \qquad (1.6)$$

إذا تم إهمال (t_b) وعلى اعتبار أن $(t_{rr} = t_a)$ يكون:–

$$t_{rr} = \sqrt{\frac{2.Q_{RR}}{di/dt}} \Rightarrow I_{RR} = I_{RR} = \sqrt{2.Q_{RR}\,\frac{di}{dt}} \qquad (1.7)$$

ومن العلاقة السابقة يمكن ملاحظة أن (I_{RR}, t_{rr}) تعتمد على كمية الشحنة $\left(\frac{di}{dt}\right)$ وكمية الشحنة في الديود تعتمد على تيار الانحياز الأمامي للديود (I_F).

المحددات (SF, Q_{RR}, I_{RR}) هي محددات تصميم الديود وتعطى في النشرة الخاصة (إستمارة البيانات) (Data Sheet) بميزات الديود .

وكما انه يوجد في الديود (Reveres Recovery Time) فإنه يوجد أيضاً (Forward Recovery Time) في حالة كون الديود في حالة الانحياز العكسي، وعند تطبيق جهد انحياز أمامي عليه فإن الديود يحتاج إلى وقت معين (Forward Recovery Time [illegible]) حتى [illegible] سريان التيار إذا [illegible] الأمامي كبيرة [illegible] الديود على هذا [illegible] (Forward Recovery Time) يحدد [illegible] ارتفاع التيار الأمامي وسرعة الفصل والوصل.

مثال:- لدينا ديود فيه $t_{rr} = 3\mu S$, $\frac{di}{dt} = 30\,A/\mu S$ أوجد:-

١- $Storage\ Charge\ Q_{RR}$

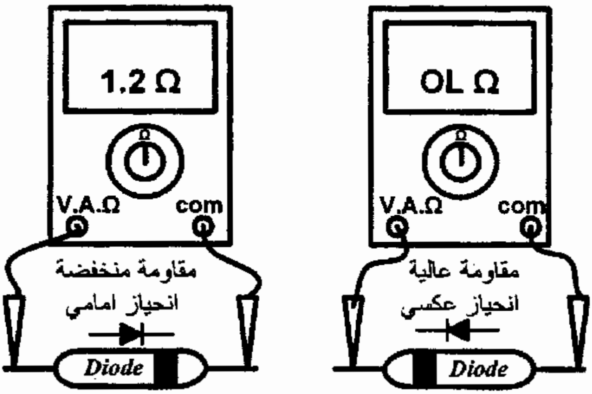
٢- $Peak\ Revers\ Current\ I_{RR}$.

الحل:-

$$Q_{RR} = \frac{1}{2} \times \frac{di}{dt}\, t_{rr}^2 = 0.5 \times \frac{30}{10^{-6}} \times \left(3 \times 10^{-6}\right)^2 = 135\mu C$$

$$I_{RR} = \sqrt{2 \times Q_{RR} \times \frac{di}{dt}} = \sqrt{2 \times \frac{135}{10^{-6}} \times 30 \times 10^{-6}} = 90A$$

تحديد صلاحية الديود:



الشكل (١-٢٢)

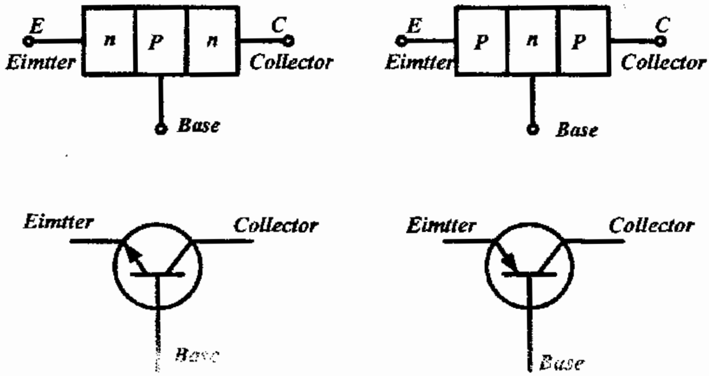
تحديد صلاحية الديود

عند فحص الديود العادي باستخدام الأوميتر فإننا نعتمد قطبية بطارية الجهاز أي يعتبر طرف (COM) موجباً والطرف (V.A.Ω) سالباً في حالة استخدام جهاز تشابهي (Analogue). أما في حالة استخدام جهاز رقمي (Digital) فيتم القراءة مباشرة كما هو موضح في الشكل (١-٢٢)،بحيث إذا كان الديود منحازاً انحيازاً أمامياً تكون قراءة الأوميتر منخفضة، أما إذا كان منحازاً انحيازاً عكسياً تكون قراءة الأوميتر مرتفعة ، أما إذا كانت قراءة جهاز الأوميتر في كلا الاتجاهين كبيرة أو صغيرة يكون الديود غير صالح.

١-٦-٢- الترانزستور Transistor

الترانزستور:- هو عنصر الكتروني ثنائي الوصلة وثلاثي الإطراف يتركب من ثلاثة طبقات شبة موصلة. الطبقات الثلاثة غير متساوية وأحجامها تحدد نوعية

الترانزستور، يوضح الشكل (١-٢٣) نوعي الترانزستور العادي المعروف باسم الترانزستور ثنائي القطبية (Bipolar Transistor)



الترانزستور ثنائي القطبية

طبقات الترانزستور هي:-

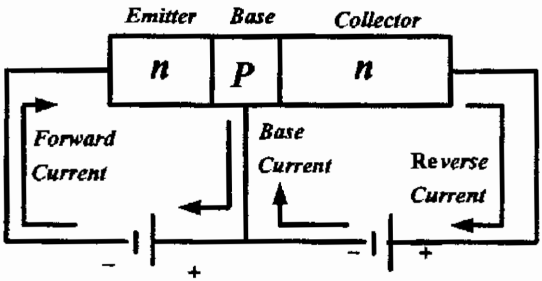
أ- الباعث (Emitter) (E):- طبقة متوسطة الحجم وتحتوي على كمية كبيرة من الشحنات (الالكترونات في (npn) والفجوات في (pnp)) وتعد مصدر التيار الرئيسي في الترانزستور.

ب-القاعدة (Base) (B):- طبقة صغيرة الحجم محصورة بين طبقتي الباعث والمجمع، تحتوي على كمية ضئيلة من الشحنات، حيث أن معظم الشحنات القادمة من الباعث تمر من خلالها إلى المجمع دون استقرار.

ج- المجمع (Collector) (C):- طبقة واسعة جداً ولكنها تحتوي على كمية متوسطة من الشوائب (الشحنات) أقل من الباعث بكثير وأكثر من القاعدة.

في الترانزستور العادي يوجد وصلتان، الوصلة الأولى بين طبقتي الباعث (E) والقاعدة (B) والوصلة الثانية بين المجمع (C) والقاعدة (B) وتتصرف كل

وصلة تماماً مثل وصلة الديود، ويمكن أن تعمل تحت حالتي التشغيل (الانحياز) الأمامية والعكسية أثناء عمل الترانزستور الطبيعي كما في الشكل (١-٢٤).



الشكل (١-٢٤)

ترانزستور وصلة (npn)

وصلة الباعث (E) والقاعدة (B):- في حالة التشغيل (الانحياز) الأمامي تتحرك الكترونات بتيار عالي القيمة بإتجاه القاعدة (B) من خلال الوصلة، حيث يطابق عمل هذه الوصلة لوحدها عمل الديود.

وصلة القاعدة (B) والمجمع (C):- في حالة الانحياز العكسي فإذا تم تشغيل هذه الوصلة لوحدها فإنها تتصرف كديود في حالة التشغيل العكسي ولا يمر تيار قطعياً وإنما يمر تيار قليل بسيط (تيار التسريب).

وبالتالي فأنه عند تشغيل الوصلتين معاً فأننا نحصل على تشغيل الترانزستور الكامل.

لكي يعمل الترانزستور في الدائرة الكهربائية لا بد من توصيل الفولتيات إلى أطرافه المختلفة بحيث تكون وصلة القاعدة-الباعث في حالة انحياز أمامي بينما تكون وصلة القاعدة المجمع في حالة انحياز عكسي. ونتيجة لذلك يعمل الترانزستور وتظهر علاقة معينة بين فولتية مدخل دارته وفولتية مخرجها وكذلك

التيار في المدخل والمخرج، هذه العلاقات بين المتغيرات المختلفة أثناء التشغيل يمكن قياسها ومعرفة تغير إحداها بالنسبة للأخر. ورسم العلاقات البيانية بين هذه المتغيرات، وبذلك نحصل على منحنيات الخواص للترانزستور.

تطبيقات الترانزمستور من حيث الاستخدام :-

١- الترانزستورات الخطية:- هي ترانزستورات مصممة للتطبيقات الخطية كتضخيم الفولتيات المتدنية المستوى.

٢- ترانزستورات التبديل:- هي ترانزستورات مصممة لدوائر التبديل.

٣- ترانزستورات القدرة:- هي ترانزستورات تعمل على مستويات كبيرة من الطاقة (تقسم تلك المكونات إلى ترانزستورات الترددات السمعية والترددات الراديوية).

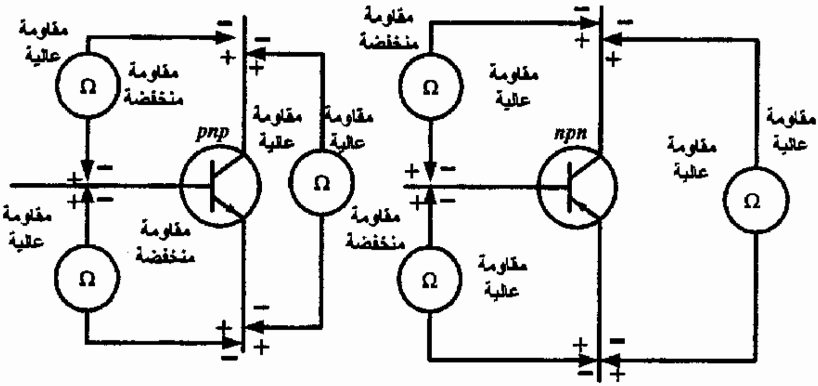
٤- ترانزستورات الترددات السمعية:- هي ترانزستورات مصممة خصيصاً للدوائر التي تنتج ترددات عالية.

تحديد أطراف الترانزستور والتأكد من صلاحيته باستخدام الأوميتر:-

يقصد بتحديد أطرافه معرفة الباعث والقاعدة والمجمع، وذلك باستخدام جهاز فاحص الترانزستور، إلا أن هذا الحهاز لا يكون متوفراً في أغلب الاحيان. فنستخدم جهاز الأوميتر بدلاً عن ذلك.

تنطلق هذه الطريقة من كون الترانزستور يتكون من ثنائيين متعاكسيين، وتعتمد على خاصية الثنائي بوجود مقاومة أمامية منخفضة له ومقاومة عكسية عالية جداً. وباستخدام جهاز الأوميتر يتم قياس المقاومات بين أطراف الترانزستور المختلفة بحيث تقاس قيمتي المقاومة بين كل طرفين. ومن خلال هذه القيم وقطبيات القياس في الحالات المختلفة يتم التعرف على صلاحية الترانزستور أو تحديد

نوعيته (NPN , PNP) وأطرافه. والشكل (١-٢٥) يبين حالـــة المقاومـــات بـــين إطراف الترانزستور المختلفة عندما يكون الترانزستور سليماً كلاً حسب نوعه.



الشكل (١-٢٥)

تحديد نوع الترانزستور وصلاحيته

الوحدة الثانية

دوائر التقويم
باستخدام الديودات

الوحدة الثانية

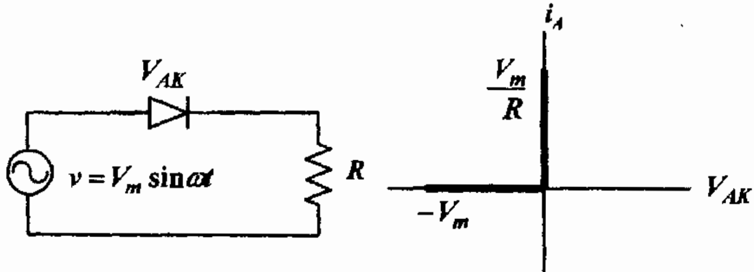
دوائر التقويم باستخدام الديودات

Rectifiers by Using Diodes

٢-١- دوائر المفاتيح والديودات

Circuit with Switches and Diodes

الديود المثالي (Ideail Diode) مقاومته الداخلية تساوي الصفر بالنسبة لتيار المهبط الموجب (i_A)، وملانهاية لتيار المهبط بالانحياز العكسي، وبالتالي فإن الديود يوصل إذا كان جهد المصدر (v) موجباً وجهد (المهبط- المصعد) (V_{AK}) مساوياً للصفر $(V_{AK}=0)$. ولا يوصل الديود أذا كان جهد المصدر أو جهد (V_{AK}) سالبين. وبالتالي حسب الشكل (٢-١) فإن نقطة عمل الديود يمكن أن تقع على المحور الموجب لتيار المهبط (i_A) ضمن المجال $\left(0 \le i_A \le V_m/R\right)$. أو على المحور السالب للجهد (V_{AK}) ضمن المجال $(0 \ge V_{AK} \ge V_m)$.



الشكل (٢-١)

دائرة الديود المثالي مع خواصه في الانحياز الامامي والعكسي

٢-١-١- المفاتيح ومصدر التيار المستمر:-

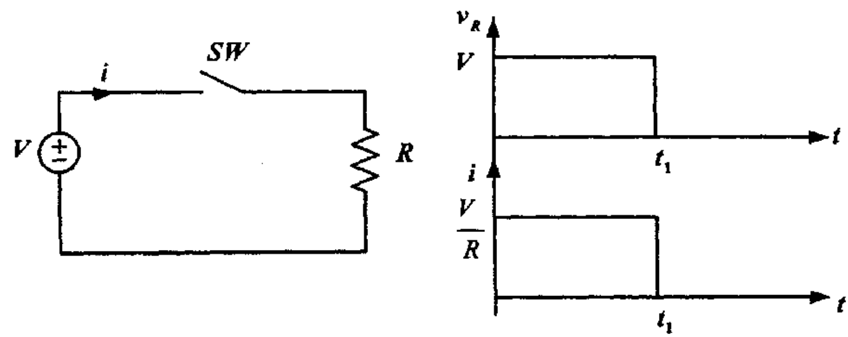
٢-١-١-١- دائرة حمل مادي ومصدر تيار مستمر

Resistive Load Circuit

الشكل (٢-٢) يبين دائرة حمل مادي موصول مع مصدر تيار مستمر من خلال مفتاح، عند غلق المفتاح (SW)عند $(t=0)$، فإن التيار يزداد لحظياً الى أقصى قيمة له. وعند فتح المفتاح فإن التيار يهبط لحظياً الى الصفر عند الزمن $(t=t_1)$.
حيث تكون قيمة التيار:-

$$i=\frac{V}{R} \qquad (2.1)$$

ومن الملاحظ انه عند فتح وغلق المفتاح في هذه الدائرة عدم حدوث شرارة كهربائية، بسبب عدم وجود أي طاقة مخزنة في المقاومة. وفرق الجهد على طرفي المفتاح في حالة الفصل $(V_S=V)$



الشكل (٢-٢)

دائرة الحمل المادي وشكل الإشارة الخارجة

٢-١-١-٢- دائرة حمل مادي سعوي

RC Load Circuit

الدائرة المبينة في الشكل (٢-٣) عند غلق المفتاح عند $(t=0)$، وبتطبيق قانون كيرشوف للجهد نجد أن :-

$$V = v_C + v_R = \frac{1}{C}\int_0^t i\,dt + R\,i \qquad (2.2)$$

وعند أجراء عملية التفاضل على المعادلة نجد أن:-

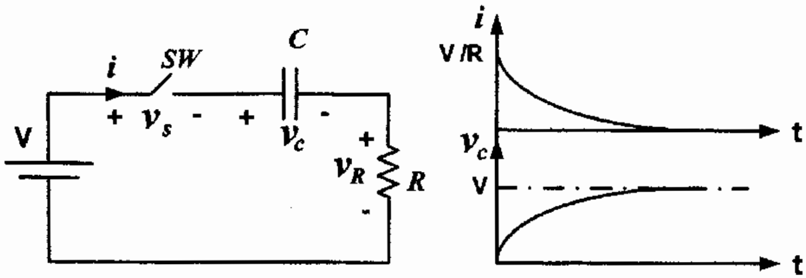
$$0 = \frac{i}{C} + \frac{di}{dt}R \qquad (2.3)$$

وبقسمة طرفي المعادلة (٢-٣) على (R) تصبح:-

$$\frac{di}{dt} + \frac{i}{CR} = 0 \qquad (2.4)$$

وهي معادلة تفاضلية من الدرجة الاولى ويكون حلها من الشكل:-

$$i = Ae^{-t/RC} \qquad (2.5)$$



الشكل (٢-٣)

دائرة حمل مادي سعوي وشكل الإشارة الخارجة

يتم إيجاد قيمة الثابت (A) من الشروط الابتدائية أي عند $(t=0)$. عند بداية عملية التوصيل. على أعتبار ان المكثف غير مشحون بشحنة سابقة، فإن قيمة الجهد على طرفي المكثف يعطى بالعلاقة:-

$$v_C = \frac{q}{C}$$

حيث أن (q): هي الشحنة بين طرفي المكثف. (C):- سعة المكثف . فإنه عند الشروط الابتدائية في الحالة العابرة عند $(t=0)$ فإن:-

$$V = v_R = Ri$$
$$\therefore i = \frac{V}{R} \qquad (2.6)$$

بالتعويض في المعادلة (٢-٥) تكون قيمة الثابت (A) مساوية:-

$$A = \frac{V}{R}$$

وبالتعويض في المعادلة (٢-٥) فإن قيمة التيار تعطى بالمعادلة:-

$$i = \frac{V}{R} e^{-t/RC} \qquad (2.7)$$

نلاحظ من المعادلة ٢-٧) أن مقاومة الدائرة تكون قليلة، وبالتالي فإنه سيتم سحب تيار عالي في البداية وذلك لفترة قصيرة. علماً بان التيار هنا يكون متقدم على الفولتية بزاوية مقدارها $(90°)$.

٢-١-١-٣- دائرة حمل مادي حثي

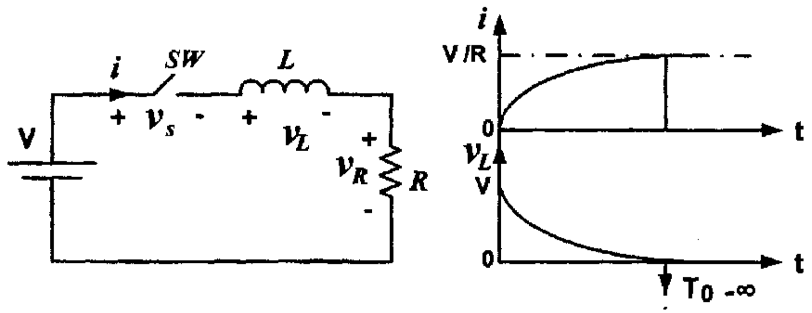
RL Load Circuit

عند غلق المفتاح في الدائرة المبينة في الشكل (٢-٤) وتطبيق قانون كيرشوف للجهد نجد أن:-

$$V = v_L + v_R = L\frac{di}{dt} + Ri \qquad (2.8)$$

وبقسمة المعادلة على المحاثة (L) تصبح المعادلة :-

$$\frac{V}{L} = \frac{di}{dt} + \frac{R}{L} i \qquad (2.9)$$



الشكل (٢-٤)

دائرة حمل حثي مادي وشكل الإشارة الخارجة

يكون التيار هنا متاخر عن الفولتية بزاوية مقدارها (90^o)، حيث يكون التيار الكلي عبارة عن مركبتين هما المركبة الاجبارية (Forced or Steady State) (i_F) وتمثل حالة الدائرة عند غلق المفتاح لفترة زمنية طويلة، والمركبة الطبيعية الحرة (Natural)(i_N) الناتجة عن فصل مصدر التغذية عن الدائرة. ويساوي التيار حاصل جمع هاتين المركبتين:-

$$i = i_F + i_N$$

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L}i = \frac{V}{L}$$

يتم الحصول على المركبة الاجبارية عندما $\left(\frac{di}{dt} = 0\right)$ ، وبالتعويض في المعادلة (2.9) فإن:-

$$0 + \frac{R}{L}i = \frac{V}{L}$$

$$\therefore i_F = \frac{V}{R}$$

ونحصل على المركبة الطبيعية للتيار عند فصل جهد التغذية عن الدائرة، وبالتالي يمكن كتابة العلاقة التالية التي تمثل الدائرة في هذه الحالة:-

$$\frac{di_N}{dt}+\frac{R}{L}i_N=0 \qquad (2.10)$$

وهي معادلة تفاضلية حلها يكون على الشكل:-

$$\therefore i_N=Ae^{-(R/L)t} \qquad (2.11)$$

قيمة التيار الكلي يعطى بالعلاقة:-

$$i=i_F+i_N \qquad (2.12)$$

$$i=\frac{V}{R}+A\,e^{-(R/L)\,t} \qquad (2.13)$$

يتم إيجاد قيمة الثابت (A) من الشروط الابتدائية، أي عند $(t=0)$ فإن التيار $(i=0)$ وبالتعويض بالمعادلة (٢-١٣) فإن:-

$$0=\frac{V}{R}+A\,e^{-(R/L)\,t}$$

$$\therefore A=-\frac{V}{R}$$

وبتعويض قيم الثابت(A) في المعادلة (٢-١٣) نحصل على قيمة التيار الكلي للدائرة:-

$$i=\frac{V}{R}-\frac{V}{R}e^{-\left(R/L\right)t}$$

$$i=\frac{V}{R}\left[1-e^{-\left(R/L\right)t}\right] \qquad (2.14)$$

ولإيجاد قيمة الفولتية على طرفي المحاثة:-

$$V_L=L\frac{di}{dt}$$

$$V_L=L\left[\frac{V}{R}\left[0+\left(\frac{R}{L}\right)e^{-\left(R/L\right)t}\right]\right]$$

$$=\frac{LVR}{LR}e^{-\left(R/L\right)t}$$

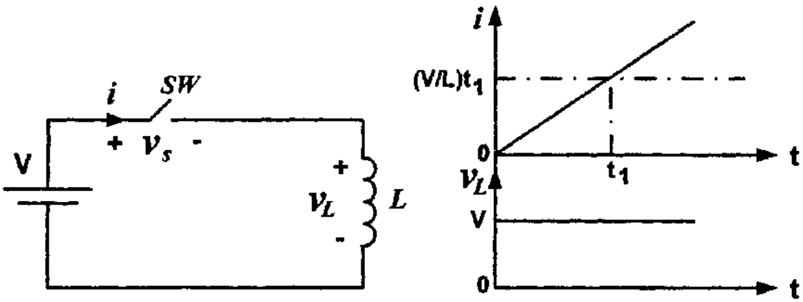
$$V_L = V\ e^{-\left(R/L\right)t} \tag{2.15}$$

عند الزمن $\left(t_1\right)$ ونتيجة لتخزين الطاقة (طاقة مغناطيسية)، سوف يمر تيار عالي مما يؤدي الى وجود جهد عالي. وبذلك سوف تحدث الشرارة الكهربائية على المفتاح بسبب كون مقاومة الملف قليلة، وللتخلص منها يجب أن نجعل قيمة مقاومة الملف كبيرة جداً.

٢-١-١-٤- دائرة حمل حثي نقي

Inductive Load Circuit

الدائرة مبينة في الشكل (٢-٥).



الشكل (٢-٥)

دائرة حمل حثي نقي وشكل الإشارة الخارجة

في هذه الحالة ممانعة المحاثة تكون كبيرة، ولكن مقاومتها قليلة جداً تصل الى الصفر $\left(R_L = 0\right)$. عند أغلاق المفتاح في اللحظة $\left(t = 0\right)$ وبتطبيق قانون كيرشوف للجهد فإن:-

$$V = L\frac{di}{dt} \tag{2.16}$$

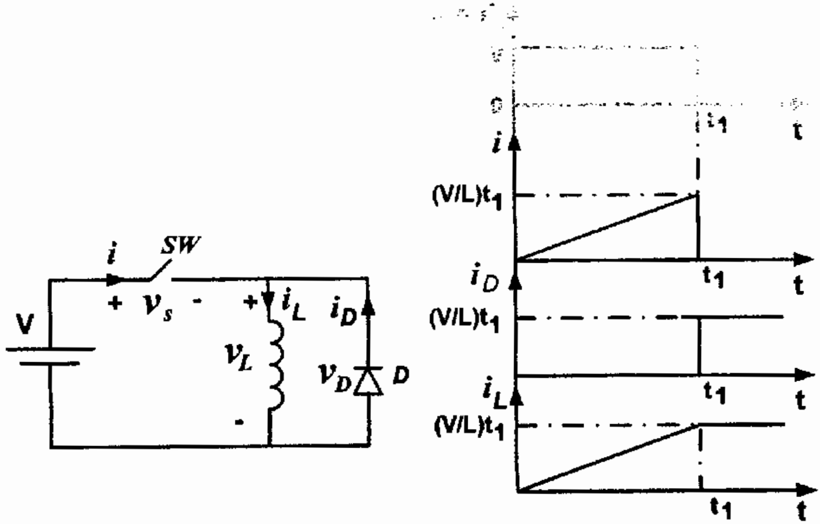
وهي معادلة تفاضلية من الدرجة الاولـــى يمكـــن إيجــاد حلهــا بطريقـــة فـــصل المتغيرات:-

$$di = \frac{V}{L} dt$$

وبمكاملة الطرفين وعلى أعتبار أن الشروط الابتدائية للجهد على طرفـــي الملـــف تساوي الصفر، فإن قيمة التيار تعطى بالعلاقة:-

$$i = \frac{V}{L} t \qquad (2.17)$$

عند فتح المفتاح سوف يمر تيار وجهد عاليان، وبذلك سوف تحدث الشرارة الكهربائية وللتخلص من هذه الحالة يتم وصل ديود مثالي على التوازي مع الملـــف [illegible] (٢-٦)، ويسمى ديود الانطلاق الحر (Free Wheeling Diode).



الشكل (٢-٦)

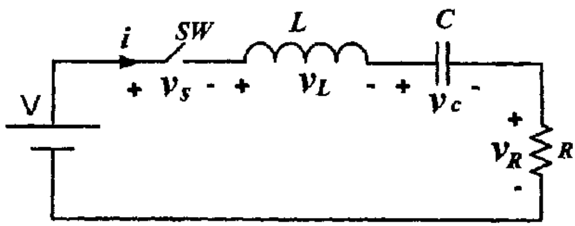
دائرة حمل حثي مع ديود الانطلاق الحر

إذا فتح المفتاح عند الزمن (t_1) فإن الطاقة المخزنة في الملف تكون عبارة عن قوة دافعة كهربائية عكسية تجعل الديود في حالة الانحياز الامامي، وبالتـالي ستمر من خلال الديود وتعود الى الملف ولا ترجع الى المفتاح. وبذلك نجد هنا عدم حدوث أي شرارة كهربائية. ويتم التخلص من الطاقة المحتجزة في الملف والـديود عن طريق مروحة لتبريد المحاثة أو باستخدام إحدى دوائر إعادة الطاقة المحتجزة الى المصدر.

٢-١-١-٥- دائرة حمل مادي حثي سعوي

RLC Load Circuit

عند غلق المفتاح (SW) عند الزمن $(t=0)$، كما في الدائرة المبينة فـي الشكل (٢-٧) وبتطبيق قوانين كيرشوف للجهد نحصل على:-



الشكل (٢-٧)

دائرة حمل مادي حثي سعوي

$$V = v_L + v_C + v_R = L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t i\, dt + Ri \qquad (2.18)$$

باشتقاق المعادلة (٢-١٨) نحصل على:-

$$0 = L\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{i}{C} + R\frac{di}{dt} \qquad (2.19)$$

بقسمة المعادلة على (L) نحصل على:-

$$\frac{d^2 i}{dt^2}+\frac{R}{L}\frac{di}{dt}+\frac{i}{LC}=0 \qquad (2.20)$$

المركبة الإجبارية للتيار يتم الحصول عليها عندما يكون:

$$\frac{di}{dt}=0 \quad \Rightarrow \frac{d^2 i}{dt^2}=0$$

من المعادلة (2.20) نجد أنها من الدرجة الثانية، لذلك فإن المركبة الاجبارية للتيار تكون مساوية للصفر $(i_F=0)$.

وهذا واضح من الدائرة حيث أن بعد مرور فترة زمنية كافية لشحن المكثف، فإن قيمة فرق الجهد على طرفي المكثف سوف يصبح مساوي لجهد المصدر وبالتالي فإن قيمة التيار المار خلال الدائرة يساوي الصفر.

المركبة الطبيعية للتيار تمثل قيمة التيار الكلي الذي يمكن إيجادة من المعادلة التفاضلية التالية:-

$$\frac{d^2 i_N}{dt^2}+\frac{R}{L}\frac{di_N}{dt}+\frac{i_N}{LC}=0 \qquad (2.21)$$

ويكون حل هذه المعادلة على الشكل:-

$$i_N = A_1\ e^{S_1 t} + A_2\ e^{S_2 t}$$

حيث أن $(S_1\ ,\ S_2)$ هي جذور المعادلة المميزة.

$$S^2+\frac{R}{L}S+\frac{1}{LC}=0 \qquad (2.22)$$

ومن أجل إيجاد الجذور نستخدم المميز:-

$$S_1\ ,\ S_2=\frac{-R}{2L}\mp\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2-\ \frac{1}{LC}} \qquad (2.23)$$

وحيث أن زيتا تمثل عامل التخميد (ζ) (Damping Factor) تساوي :-

$$\zeta = \frac{R}{2L}$$

وأن تردد الرنيين (Resonant Frequency) يساوي:-

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

وبالتالي فإن:-

$$S_1 \ , S_2 = -\zeta \mp \sqrt{\zeta^2 - \omega_0^2} \qquad (2.24)$$

وجذرا المعادلة هما:-

$$S_1 = -\zeta - \sqrt{\zeta^2 - \omega_0^2}$$
$$S_2 = -\zeta + \sqrt{\zeta^2 - \omega_0^2}$$

ولإيجاد الحل العام للتيار من هذه الدائرة فإنه لا بد من مناقشة الحالات التالية:

١- إذا كانت $(\zeta = \omega_0)$ في هذه الحالة يكون للمعادلة جذران حقيقيان متساويان، وتدعى الدائرة في هذه الحالة بالتخميد الحرج. وحل المعادلة التفاضلية يكون على الشكل:-

$$i_N = (A_1 + A_2\, t)\, e^{St} \qquad (2.25)$$

٢- إذا كانت $(\zeta > \omega_0)$ في هذه الحالة يكون للمعادلة جذران حقيقيان مختلفان، وتدعى الدائرة في هذه الحالة بالتخميد فوق الحرج (Over Damping). وحل المعادلة التفاضلية يكون على الشكل:-

$$i_N = A_1\ e^{S_1 t} + A_2\ e^{S_2 t} \qquad (2.26)$$

٣- إذا كانت $(\zeta < \omega_0)$ في هذه الحالة يكون للمعادلة جذران مترافقان تخيليان، وتدعى الدائرة بالتخميد تحت الحرج (Under Damping). وحل المعادلة التفاضلية يكون على الشكل:-

$$S_1 \,,\, S_2 = -\zeta \mp j\omega_r \qquad (2.27)$$

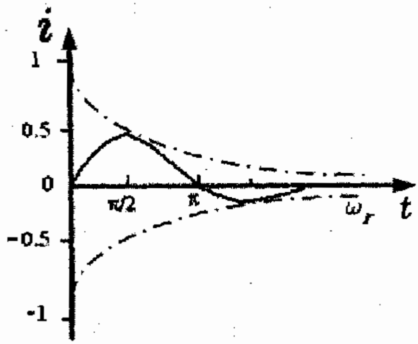
حيث أن (ω_r) (Damped Resonant Frequency) وتساوي:-

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - \zeta^2}$$

وحل المعادلة يكون على الشكل:-

$$\therefore\ i_N = e^{-\zeta t}\left[A_1 \cos \omega_r t + A_2 \sin \omega_r t\right] \qquad (2.28)$$

وهي عبارة عن موجة (Damped Sinusoidal) كما في الشكل (٢-٨). ومرة آخرى يمكن إيجاد قيم الثوابت $(A_1\ ,\ A_2)$ من الظروف الابتدائية.



الشكل (٢-٨)

شكل الإشارة الخارجة

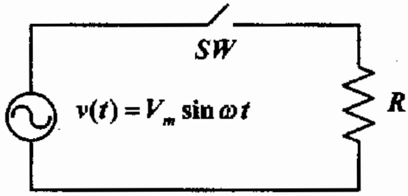
٢-١-٢- المفاتيح ومصدر التيار المتناوب

AC Source and Switches

٢-١-٢-١- دائرة حمل مادي

R - Load Circuit

الدائرة المبينة في الشكل (٢-٩) تحتوي على مصدر تيار متناوب ومفتاح مع حمل مادي.



الشكل (٢-٩)
دائرة مصدر تيار متناوب ومفتاح مع حمل مادي

التيار المار خلال هذه الدائرة عند اغلاق المفتاح في اللحظة $(t = 0)$ يمثل المركبة الاجبارية للتيار والتي تعطي بالعلاقة:-

$$i_F = \frac{v(t)}{R} = \frac{V_m \sin \omega t}{R} \qquad (2.29)$$

المركبة الطبيعية للتيار في هذه الحالة تساوي الصفر لعدم وجود عناصر مخزنة للطاقة في الدائرة.

$$i_N = 0$$

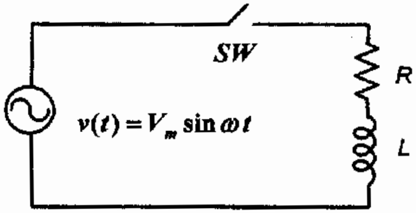
وبالتالي فإن القيمة الكلية للتيار تساوي:-

$$i(t) = i_F + i_N = \frac{V_m \sin \omega t}{R} \qquad (2.30)$$

٢-١-٢-٢- دائرة حمل مادي حثي

RL - Load Circuit

الدائرة المبينة في الشكل (٢-١٠) تحتوي على مصدر تيار متناوب ومفتاح مع حمل مادي موصول على التوالي مع ملف.



الشكل (٢-١٠)

دائرة مصدر تيار متناوب ومفتاح مع حمل مادي حثي

وبتطبيق قوانين كيرشوف للجهد نحصل على:-

$$L\frac{di}{dt}+Ri=V_m \sin \omega t \qquad (2.31)$$

المركبة الإجبارية تمثل التيار المار في الدائرة عند أغلاق المفتاح في اللحظة $(t=0)$ وتعطي العلاقة:-

$$i_F=\frac{V_m \sin(\omega t-\phi)}{Z} \qquad (2.32)$$

حيث أن (ϕ) :- هي زاوية فرق الطور بين الجهد والتيار وتساوي:-

$$\phi=\tan^{-1}\frac{X_L}{R}=\tan^{-1}\frac{\omega L}{R} \qquad (2.33)$$

وأن (Z) :- هي ممانعة الدائرة وتساوي:-

$$Z=\sqrt{R^2+X_L^2}$$

يتم الحصول على المركبة الطبيعية للتيار بعد فصل مصدر التغذية عن الدائرة وتحسب من حل المعادلة التفاضلية التالية:-

$$L\frac{di_N}{dt}+Ri_N=0$$

وحل المعادلة التفاضلية هو من الشكل:-

$$i_N=Ae^{-t\frac{R}{L}} \qquad (2.34)$$

قيمة التيار الكلي المار في الدائرة هي عبارة عن مجموع المــركبتين الاجباريــة والطبيعية وتساوي:-

$$i(t)=i_F+i_N=\frac{V_m\sin(\omega t-\phi)}{Z}+A\,e^{-t\frac{R}{L}} \qquad (2.35)$$

ويتم احتساب قيمة الثابت (A) من الشروط الابتدائية.

٢-١-٢-٣- دائرة حمل مادي سعوي

RC - Load Circuit

الدائرة المبينة في الشكل (٢-١١) تحتوي على مصدر تيار متناوب ومفتاح مع حمل مادي موصول على التوالي مع مكثف.

وبتطبيق قوانين كيرشوف للجهد نحصل على:-

$$Ri+\frac{1}{C}\int_0^t i\ dt=V_m\sin\omega t \qquad (2.36)$$

المركبة الإجبارية للتيار يتم الحصول عليها عند أغلاق المفتاح في اللحظة $(t=0)$ وتعطي العلاقة:-

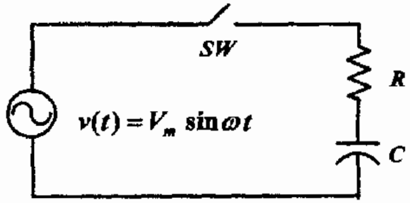
$$i_F=\frac{V_m\sin(\omega t+\phi)}{Z} \qquad (2.37)$$

حيث أن (ϕ):- هي زاوية فرق الطور بين الجهد والتيار وتساوي:-

$$\phi=\tan^{-1}\frac{X_C}{R}=\tan^{-1}\frac{1}{R\omega c} \qquad (2.38)$$

وأن (Z):- هي ممانعة الدائرة وتساوي:-

$$Z=\sqrt{R^2+\left(\frac{1}{\omega c}\right)^2}$$



الشكل (٢-١١)

دائرة مصدر تيار متناوب ومفتاح مع حمل مادي سعوي

المركبة الطبيعية للتيار، يتم الحصول عليها بعد فصل مصدر التغذية عن الـــدائرة وتحسب من المعادلة التفاضلية التالية:-

$$Ri_N + \frac{1}{C}\int i_N\,dt = 0 \qquad (2.39)$$

باشتقاق العلاقة وعلى أعتبار ان القيمة الابتدائية للجهد على طرفي المكثف تساوي الصفر نحصل على:-

$$R\frac{di_N}{dt} + \frac{1}{C}i_N = 0 \;\Rightarrow\; \frac{di_N}{dt} + \frac{1}{RC}i_N = 0 \qquad (2.40)$$

وهي معادلة تفاضلية من الدرجة الاولى وحلها يكون على الشكل التالي:-

$$i_N = A\,e^{-t\frac{1}{RC}} \qquad (2.41)$$

قيمة التيار الكلي المار في الدائرة عبارة عن مجموع المركبتين الاجبارية والطبيعية وتساوي:-

$$i(t) = i_F + i_N = \frac{V_m \sin(\omega t + \phi)}{Z} + A\,e^{-t\frac{1}{RC}} \qquad (2.42)$$

ويتم احتساب قيمة الثابت (A) من الشروط الابتدائية.

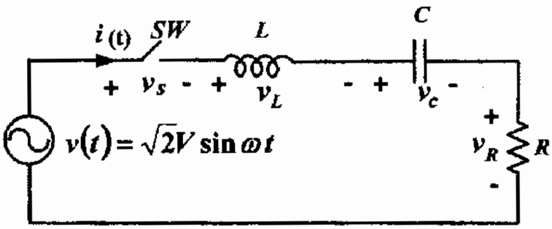
٢-١-٢-٤- دائرة حمل حثي مادي سعوي

RLC - Load Circuit

من الدائرة المبينة في الشكل (٢-١٢) فإن فولتية المصدر لدائرة حمل مادي حثي سعوي تساوي:-

$$v(t) = \sqrt{2}V \sin \omega t$$

حيث أن (V):- هي القيمة الفعالة لجهد المصدر.



الشكل (٢-١٢)

دائرة حمل مادي حثي سعوي ومصدر تيار متناوب

عند غلق المفتاح (SW) عند الزمن $(t = 0)$، وحسب قانون كيرشوف فإن:-

$$\sqrt{2}V \sin \omega t = L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t i\, dt + Ri \qquad (2.43)$$

وعند اشتقاق المعادلة وقسمتها على (L) تصبح:-

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{di}{dt} + \frac{1}{LC}i = \frac{\sqrt{2}V\omega}{L}\cos \omega t \qquad (2.44)$$

مركبة التيار الاجبارية تعطى بالعلاقة:-

$$i_F = \frac{V_{Total}}{Z} = \frac{\sqrt{2}\ V \sin(\omega t - \phi)}{\left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2\right]^{1/2}} \qquad (2.45)$$

حيث أن :-

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2}$$

مركبة التيار الطبيعية الناتجة عن فصل مصدر التغذية عن الدائرة وبإستخدام ناتج حل المعادلة التفاضلية نحصل على:

$$\frac{d^2 i_N}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{di_N}{dt} + \frac{1}{LC} i_N = 0$$

باستخدام تحويلات لابلاس وحل المعادلة من الشكل:-

$$S^2 + \frac{R}{L} S + \frac{1}{LC} = 0$$

على اعتبار أن جذور المعادلة المميزة هي جذور حقيقية مختلفة $\left(\zeta > \omega_0\right)$، فإن:-

$$i_N = i = A_1\, e^{S_1 t} + A_2\, e^{S_2 t} \qquad (2.46)$$

والقيمة الكلية للتيار تعطي بالعلاقة:-

$$i = i_F + i_N = \frac{\sqrt{2} V \sin(\omega t - \phi)}{\left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} + A_1\, e^{S_1 t} + A_2\, e^{S_2 t} \qquad (2.47)$$

وكما هو في حالة التيار المباشر نجد قيم الثوابت $\left(A_1 , A_2\right)$ من الظروف الابتدائية.

٢-٢- تحليلات فورير

Fouruer Analysis

في الحالة المستقرة للدوائر الكهربائية يكون جهد المخرج لمحـول القـدرة عبارة عن موجة دورية (Periode Function) مع الزمن ويعطى بالعلاقة:-

$$v_o(t) = v_o(t + T)$$

حيث أن (T) :- هو الزمن الدوري، إذا كان $(T = 2\pi)$ فإن:-

$$T = \frac{1}{f} \quad , \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

$$v_o(\omega t) = v_o(\omega t + 2\pi)$$

وتنص نظرية فورير أن أي موجة دورية يمكــن أن توصــف أو تحلــل بواسطة مقدار ثابت ومجموع غير متناهي من سلاسل الجيب وجيب التمام من أجل تردد $(n\omega)$، حيث أن (n) هو عدد صحيح ويعبر عنها بالشكل التالي:-

$$v_o(t) = a_o + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \quad (2.48)$$

وقيم الثوابت $(b_n\ ,\ a_n\ ,\ a_o)$ تعطي بالعلاقات التالية:-

$$a_o = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)\,d\omega t = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} v(t)\,d\omega t \quad (2.49)$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T v(t)\cos n\omega t\,d\omega t = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} v(t)\cos n\omega t\,d\omega t \quad (2.50)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T v(t)\sin n\omega t\,d\omega t = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} v(t)\sin n\omega t\,d\omega t \quad (2.51)$$

وهنالك شكل آخر للتعبير عن سلسلة فورير بالشكل التالي:-

$$v_o(t) = a_o + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \phi) \quad (2.52)$$

حيث أن:-

$$a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}\left[\frac{a_n}{\sqrt{a_n^2+b_n^2}}\cos n\omega t\right.$$

$$\left. + \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2+b_n^2}}\sin n\omega t\right] = \sqrt{a_n^2+b_n^2}\left[\sin\phi_n \cos n\omega t + \cos\phi_n \sin n\omega t\right]$$

$$= \sqrt{a_n^2+b_n^2}\left[\sin(n\omega t + \phi_n)\right] = c_n \sin(n\omega t + \phi_n) \qquad (2.53)$$

حيث أن:-

$$\phi_n = \tan^{-1}\frac{a_n}{b_n} \qquad (2.54)$$

c_n :- تمثل القيمة العظمى لمفكوك رقم (n) لجهد المخرج.

ϕ_n :- تمثل زاوية التأخير لمفكوك رقم (n) لجهد المخرج.

وهنالك بعض الحالات الخاصة للموجات التي يتم تحليلها بإستخدام فورير نورد منها بعض الامثلة:-

١- الموجة التناظرية التي يكون فيها النصف الموجب مرآة للنصف السالب، وإزاحة طورية يساوي نصف الزمن الدوري.

لهذه الموجة يكون:-

$$a_o = 0$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T v(t)\cos n\omega t \, d\omega t = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} v(\omega t)\cos n\omega t \, d\omega t \qquad (2.55)$$

$$n = 1,3,5,........$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T v(t)\sin n\omega t \, d\omega t = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} v(\omega t)\sin n\omega t \, d\omega t \qquad (2.56)$$

$$n = 1,3,5,........$$

$$v_o(t) = \sum_{n=1,3,5,....}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \phi) \qquad (2.57)$$

٢- الموجة الفردية (Odd Wave):- وهي موجة تحقق العلاقة:-

$$f(-t)=-f(t)$$

ويكون:-

$$\int_{-T/2}^{T/2} f(t)dt = 0 \qquad (2.58)$$

في هذه الموجة تعطى العلاقات كما يلي:-

$$a_o = a_n = 0$$

$$b_n = \frac{4}{T}\int_0^{T/2} v(t)\sin n\omega t\, d\omega t$$

$$v_o(t) = \sum_{n=1.}^{\infty} b_n \sin n\omega t$$

$$v_o(t) = b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + b_3 \sin 3\omega t + ... \qquad (2.59)$$

إذا كان $(T = 2\pi)$ فإن:-

$$b_n = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} v(t)\sin n\omega t\, d\omega t \qquad (2.60)$$

٣- الموجة الزوجية (Even Wave):- هي موجة تحقق الشرط:-

$$f(-t) = f(t)$$

وفي هذا النوع من الموجات يكون قيمة الثابت $(b_n = 0)$، ويعطى كل من الثوابت $(a_o\ , a_n)$ بالعلاقات التالية:-

$$a_o = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} v_o(t)\, dt \qquad (2.61)$$

$$a_n = \frac{4}{T}\int_0^{T/2} v_o(t)\cos n\omega t\, d\omega t \qquad , n = 1,2,3,...... \qquad (2.62)$$

من أجل $(T = 2\pi)$ فإن:-

$$a_o = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} v_o(t)\, dt$$

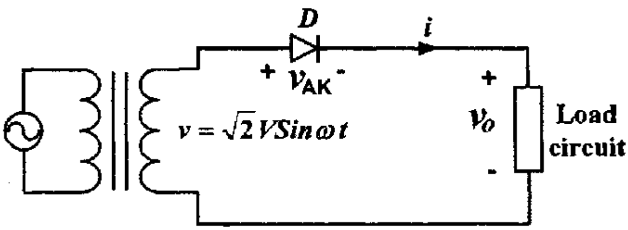
$$a_n = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} v_o(t)\cos n\omega t\, d\omega t \qquad , n = 1,2,3,......$$

$$v_o(t) = a_o + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t + ... \quad (2.63)$$

٢-٢-١- تحليل فورير لدائرة تقويم أحادية الطور نصف موجة

للدائرة الموضحة في الشكل (٢-١٣) يسري التيار عندما يكون:-

$$(v - v_o > 0) \qquad , \qquad v_{AK} = 0$$



الشكل (٢-١٣)

دائرة موحد نصف موجة

ويمكن وصف فولتية التقويم حسب تحليل فورير كما يلي:-

$$v_o = V_o + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos n\omega t \qquad (2.64)$$

الزاوية التي يبدأ عندها الديود بالتوصيل تسمى زاوية القدح (α)(Firing angle)

والزاوية التي يفصل عندها الديود تسمى زاوية الاخماد (β) (Extinction angle)

وبالتالي فإن زاوية التوصيل (γ) (Conduction angle) تساوي:-

$$\gamma = \beta - \alpha \quad [rad] \qquad (2.65)$$

وللديود فإن $(\alpha = 0)$ وان $(\gamma = \beta)$، حيث تعتمد زاوية التخميد (β) على طبيعة الحمل.

ولإيجاد القيمة المتوسطة للفولتية والتي يطلق عليها احياناً بفولتية التيار المباشر:-

$$V_o = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} v_o \, d(\omega t) = \frac{1}{2\pi}\int_\alpha^{\beta} v_o \, d(\omega t) \qquad (2.66)$$

قيم معاملات سلسلة فورير:-

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} v_o \sin\ n\omega t \, d(\omega t) = \frac{1}{\pi}\int_\alpha^{\beta} v_o \sin\ n\omega t \, d(\omega t) \qquad (2.67)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} v_o \cos\ n\omega t \, d(\omega t) = \frac{1}{\pi}\int_\alpha^{\beta} v_o \cos\ n\omega t \, d(\omega t) \qquad (2.68)$$

القيمة الفعالة لجهد التوافقية (nth) تعطى بالعلاقة:-

$$V_{nR} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[a_n^2 + b_n^2\right]^{1/2} \qquad (2.69)$$

القيمة الفعالة لجهد الخرج (الجهد المقوّم) الدالة الدورية هي:-

$$V_R = \left[\frac{1}{2\pi}\int_\alpha^{\beta} v_o^2 \, d(\omega t)\right]^{1/2} = \left[V_o^2 + \sum V_{nR}^2\right]^{1/2} \qquad (2.70)$$

ويعطى جهد التموج بالعلاقة (القيمة الفعالة لكل التوافقيات):-

$$V_{RI} = \left[\sum V_{nR}^2\right]^{1/2} = \left[V_R^2 - V_o^2\right]^{1/2} \qquad (2.71)$$

أما معامل تموج الجهد (Voltage Ripple Factor) فيعطى بالعلاقة:-

$$Kv = \frac{V_{RI}}{V_o} \qquad (2.72)$$

يمكن وصف تيار الحمل حسب سلسلة فورير بالشكل التالي:-

حيث أن:-

$$c_n = \frac{a_n}{Z_n} \quad , \quad d_n = \frac{b_n}{Z_n} \quad , \quad \phi_n = tan^{-1}\frac{n\omega L}{R}$$

وأن:-

$$I_o = \frac{V_o}{R}$$

من المعادلة السابقة فإن (Z_n) هي ممانعة الحمل في الدائرة المبينـــة فـــي الشكل (٢-١٠)، حيث تحتوي الممانعة على مقاومة ومحاثة، وتكون القيمة الفعالة لتيار التوافقية (nth) بالعلاقة:-

$$I_{nR} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[c_n^2 + d_n^2\right]^{1/2} \qquad (2.73)$$

القيمة الفعالة لتيار الخرج من اجل مجموع التوافقيات تعطى بالعلاقة:-

$$I_R = \left[I_o^2 + \sum I_{nR}^2\right]^{1/2}$$

تيار التموج يعطى بالعلاقة:-

$$I_{RI} = \left[I_{nR}^2\right]^{1/2} = \left[I_R^2 - I_o^2\right]^{1/2} \qquad (2.74)$$

أما معامل تموج التيار (Current Ripple Factor) فيعطى بالعلاقة:-

$$K_i = \frac{I_{RI}}{I_o} \qquad (2.75)$$

٢-٣- دوائر التقويم أحادية الطور

Single Phase- Rectifiers

دوائر التقويم تتألف من جزئين أساسيين هما:-

أ- محددات العمل . ب- أنواع دوائر التقويم.

أ- محددات العمل تقسم إلى محددات دائرة المدخل ومحددات دائرة المخرج.

وتقسم هذه المحددات إلى الأقسام الرئيسية الآتية:-

١- القيمة المتوسطة لجهد الحمل (المستمر) $(V_{av} = V_{dc} = V_o)$.

٢- القيمة المتوسطة لتيار الحمل (المستمر) $(I_{av} = I_{dc} = I_o)$.

٣- القيمة الفعالة لجهد الحمل (المتناوب) $(V_R = V_{rms})$.

٤- القيمة الفعالة لتيار الحمل (المتناوب) $(I_R = I_{rms})$.

٥- قدرة الحمل المستمرة $(P_{dc} = V_{dc} \times I_{dc})$.

٦- قدرة الحمل المتناوبة $(P_{ac} = V_{rms} \times I_{rms})$.

٧- مردود التقويم (Efficiency):-

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} \qquad (2.77)$$

٨- القيمة الفعالة لجهد الخرج يتكون من مركبتين مركبة جهد مستمر ومركبة القيمة الفعالة التوافقية:-

$$V_R = \sqrt{(V_o)^2 + \left(\sum V_{nR}^2\right)} \qquad (2.78)$$

٩- معامل الشكل (Form Factor) :-

$$F.F = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} \qquad (2.79)$$

١٠- معامل التموج (Ripple Factor):-

$$RF = \sqrt{(F.F)^2 - 1} \qquad (2.80)$$

١١- معامل التموج للجهد (Voltage Ripple Factor) (K_v) يعطى بالعلاقة:-

$$K_v = \frac{V_{RI}}{V_o} = \sqrt{\frac{V_R^2 - V_o^2}{V_o^2}} \qquad (2.81)$$

١٢- معامل الاستعمال (Transformer Utilization Factor) في حالة وجود محول في دائرة الدخل:-

$$TUF = \frac{P_{dc}}{V_S \cdot I_S} \qquad (2.82)$$

حيث أن:- I_S : القيمة الفعالة لتيار الملف الثانوي للمحول.

V_S : القيمة الفعالة لجهد الملف الثانوي للمحول.

١٢- معامل الإزاحة (Displacement Factor):- على اعتبار أن (Φ) هي زاوية الإزاحة بين المركبات الأساسية للجهد والتيار في الملفات الابتدائية للمحول. فان معامل الازاحة يعطى بالعلاقة :-

$$DF = Cos\,\Phi \qquad (2.83)$$

١٣- معامل التوافقية (Harmonic Factor):-

$$HF = \sqrt{\frac{I_S^2 - I_1^2}{I_1^2}} = \sqrt{\left(\frac{I_S}{I_1}\right)^2 - 1} \qquad (2.84)$$

حيث ان (I_1) :-هي القيمة الفعالة الأساسية لتيار الدخل.

١٤- معامل القدرة (Power Factor):-

$$PF = \frac{V_S \cdot I_1}{V_S \cdot I_S} Cos\,\Phi = \frac{I_1}{I_S} Cos\,\Phi \qquad (2.85)$$

١٥- القيمة العظمى لجهد الانحياز العكسي (PIV) (Peak Inverse Voltage):-
وتمثل اكبرقيمة لجهد الانحياز العكسي التي تؤثر على العناصر المستخدمة في الدوائر الالكترونية .

إذا كان تيار الدخل ذو موجة جيبيه فإن $(PF = DF, I_S = I_1)$، والقيم المثلى للمحددات تكون كما يلي:-

$$\eta = 100\%, V_{ac} = 0, F.F = 1, \; TUF = 1, \quad HF = 0, \quad PF = 1, \quad RF = 0$$

ب- أنواع دوائر التقويم باستخدام الديودات:-

المبدأ الأساسي لعملية التقويم باستخدام الديودات هو السماح للتيار بالمرور باتجاه واحد وعدم السماح له بالمرور بالاتجاه المعاكس. وتقسم دوائر التقويم باستخدام الديودات الى الاقسام الرئيسية التالية:-

١- دوائر تقويم أحادية الطور:- وتقسم بدورها الى قسمين أساسيين هما:-

أ- دوائر تقويم أحادية الطور نصف موجة.

ب- دوائر تقويم أحادية الطور موجة كاملة.

٢- دوائر تقويم ثلاثية الطور:- وتقسم بدورها الى قسمين اساسيين هما:-

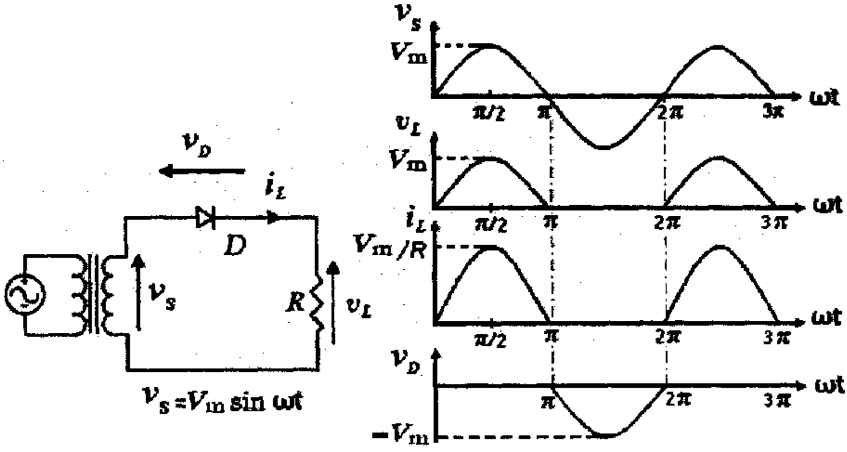
أ- دوائر تقويم ثلاثية الطور نصف موجة.

ب- دوائر تقويم ثلاثية الطور موجة كاملة.

٢-٣-١- التقويم أحادي الطور نصف موجة بحمل مادي:-

Resistive Load Single Phase-Half Wave Rectifier Circuits

المقوم أحادي الطور نصف الموجة هو عنصر يقوم بتحويل الجهد المتناوب إلى جهد مستمر فقط في نصف موجة الدخل. والشكل (٢-١٤) يبين دائرة تقويم أحادي الطور نصف موجة بحمل مادي.



الشكل (٢-١٤)

دائرة تقويم أحادية الطور مع حمل مادي وشكل الإشارة الخارجة

إيجاد القيم الفعالة والقيم المتوسطة لجهد وتيار الحمل:-

القيمة المتوسطة:-

إذا كان الحمل ماديا (R)، وكان الجهد في موجة الدخل يعطى بالعلاقة الجيبية التالية :-

$$v(t) = V_m \, Sin\,(\omega t) \tag{2.86}$$

فان القيمة المتوسطة للجهد على أطراف الحمل تحدد من العلاقة:-

$$V_o = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)\,dt \tag{2.87}$$

وللفترة التي يكون فيها الديود في حالة توصيل $(0 < \omega t < \pi)$ فإن:-

$$V_o = V_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} v(t)\, d(\omega\, t)$$

$$= \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} V_m Sin(\omega t)\, d(\omega\, t) = \frac{-V_m}{2\pi} Cos(\omega t)\Big|_0^{\pi} \qquad (2.87)$$

$$= -\frac{V_m}{2\pi.}\left[Cos\,\pi - Cos\,0\right] = \frac{V_m}{\pi}$$

وللفترة $(\pi < \omega t < 2\pi)$ فإن:-

$$V_o = 0$$

للفترة $(0 < \omega t < 2\pi)$ فإن:-

$$V_o = V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} = 0.318 V_m$$

القيمة المتوسطة لتيار الحمل:-

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{V_m}{\pi R} = \frac{0.318\, V_m}{R} \qquad (2.88)$$

القيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل :-

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} v^2(t)\, dt} \qquad (2.89)$$

القيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل تساوي:-

$$V_R = V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} (V_m\ Sin\,\omega t)^2\, dt} = \frac{V_m}{2} = 0.5\, V_m \qquad (2.90)$$

القيمة الفعالة للتيار عبر الحمل تساوي:-

$$I_R = I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{V_m}{2 \times R} \qquad (2.91)$$

القيمة الفعالة لجهد المصدر تساوي:-

$$V_s = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \qquad (2.92)$$

ومنها فإن القيمة العظمى بدلالة القيمة الفعالة لجهد المصدر تساوي:-

$$V_m = \sqrt{2}\ V_s$$

وبتعويض هذه القيمة في معادلة القيمة المتوسطة للجهد فإن:-

$$V_o = \frac{V_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2} \times V_s}{\pi} = 0.45 \times V_s \qquad (2.93)$$

أي أن قيمة الجهد المقوم اقل بكثير من القيمة الفعالة لجهد المصدر.

جهد التموج يعطى بالعلاقة:-

$$V_{RI} = \sqrt{V_R^2 - V_o^2} = V_o\sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1} = 1.211\ V_o \qquad (2.94)$$

معامل التموج للجهد:-

$$K_v = \frac{V_{RI}}{V_o} = 1.211 \qquad (2.95)$$

وفي هذه الحالة فإن معامل التموج للجهد يساوي معامل التموج للتيار:-

$$K_i = K_v = 1.211 \qquad (2.96)$$

للتقويم أحادي الطور نصف موجة يكون :-

$$V_o = V_{dc} = 0.318 \times V_m = 0.45\ V_S$$

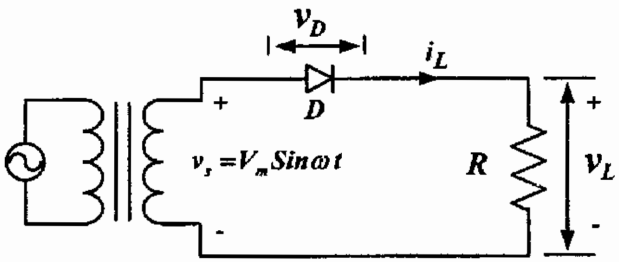
$$V_R = V_{rms} = 0.5 \times V_m$$

$$\frac{V_R}{V_o} = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{0.5}{0.318} = 1.57$$

$$RF = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{dc}}\right)^2 - 1} = \sqrt{(1.57)^2 - 1} = 1.212$$

مثال (٢-١):- لدائرة التقويم المبينة في الشكل (٢-١٥) على اعتبار أن الحمـل عبارة عن مقاومة فإن المطلوب حساب:-

١- مردود التقويم (η).
٢- معامل الشكل $(F.F)$.
٣- معامل التموج $(R.F)$.
٤- معامل الاستعمال (TUF).
٥-القيمة العظمى لجهد الانحياز العكسي للديود (PIV).



الشكل (٢-١٥)
مقوم أحادي الطور نصف موجة

الحل:-

$$V_o = V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} = 0.318 \times V_m$$

$$I_o = I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{0.318 \times V_m}{R}$$

$$V_R = V_{rms} = 0.5 \times V_m$$

$$I_R = I_{rms} = \frac{0.5 \times V_m}{R}$$

$$P_{dc} = V_{dc} \times I_{dc} = 0.318\, V_m \times \frac{0.318\, V_m}{R} = \frac{(0.318\, V_m)^2}{R}$$

$$P_{ac} = V_{rms} \times I_{rms} = \frac{(0.5\,V_m)^2}{R}$$

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{(0.318\,V_m)^2/R}{(0.5\,V_m)^2/R} = 40.5\,\%$$

$$F.F = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{0.5\,V_m}{0.318\,V_m} = 1.57 = 157\,\%$$

$$RF = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{dc}}\right)^2 - 1} = \sqrt{\left(\frac{0.5\,V_m}{0.318\,V_m}\right)^2 - 1} = 1.21 = 121\,\%$$

$$V_S = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707\,V_m$$

القيمة الفعالة لتيار الملف الثانوي للمحول هي نفسها للحمل أي أن :-

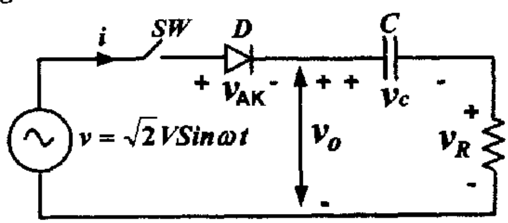
$$I_S = \frac{0.5\,V_m}{R}$$

$$TUF = \frac{P_{dc}}{V_S \cdot I_S} = \frac{(0.318\,V_m)^2/R}{0.707\,V_m \times \frac{0.5\,V_m}{R}} = \frac{(0.318)^2}{0.707 \times 0.5} = 0.286$$

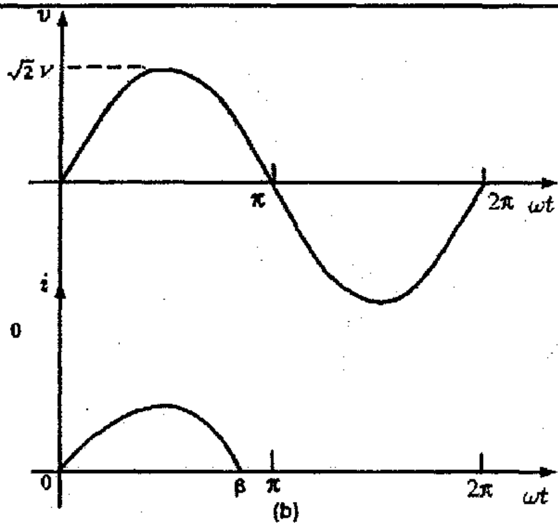
$$PIV = V_m$$

٢-٣-٢- التقويم أحادي الطور نصف موجة بحمل مادي سعوي:-

RC Load Single Phase-Half Wave Rectifier Circuits



الشكل (٢-١٦) a) موحد نصف موجة بحمل مادي سعوي



الشكل (٢-١٦)

b) شكل إشارة جهد الدخل وتيار الحمل

عند غلق المفتاح (SW) في الدائرة المبينة في الشكل (٢-١٦)، فإن معادلة الفولتية تساوي:-

$$v_C + v_R = v_o = v \qquad (2.97)$$

$$\frac{1}{C}\int_0^t i\,dt + v_{C(0)} + Ri = V_m \sin \omega t \qquad (2.98)$$

على أعتبار أن المكثف غير مشحون $(v_{C(0)} = 0)$

تكون المركبة الاجبارية (i_F) للتيار:-

$$i_F = \frac{V_m}{Z}\sin(\omega t + \phi) \qquad (2.99)$$

$$\phi = \tan^{-1}\frac{1}{\omega CR}$$

$$Z = \left[R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]^{1/2}$$

أما المركبة الطبيعية (i_N) للتيار:-

$$i_N = A e^{-t/RC}$$

وبالتالي فإن علاقة التيار الكلي تكون:-

$$i = i_F + i_N = \frac{V_m}{Z} sin(\omega t + \phi) + A e^{-t/RC} \qquad (2.100)$$

من الشروط الابتدائية عندما تكون شحنة المكثف تساوي الصفر نجد قيمة الثابت (A)، عندما $(t=0)$ فإن $(V_C = 0)$ و $(i=0)$ أي لا يوجد مرور للتيار عبر الدائرة.

$$0 = \frac{V_m}{Z} sin(0 + \phi) + A$$

$$\therefore A = -\frac{V_m}{Z} sin\,\phi$$

وتصبح المعادلة النهائية للتيار كما في العلاقة:-

$$i = \frac{V_m}{Z} \left[sin(\omega t + \phi) - e^{-t/RC}\, sin\,\phi \right] \qquad (2.101)$$

فرق الجهد على طرفي المكثف يعطى بالعلاقة:-

$$V_C = \frac{1}{C} \int_0^t i \; dt$$

$$= V_m \;\; Sin\,\phi \left[Cos\,\phi\, e^{-t/R.C} - Cos(\omega t + \phi) \right]$$

وعند نهاية موجة التيار عند $\left(\omega t = \beta > \frac{\pi}{2}\right)$، يكون جهد المكثف (V_c) موجباً، لهذا يكون المكثف مشحون ايجابياً عند بداية الموجة الثانية للتيار عندما تكون $(V = V_o)$. ويكون الديود في حالة التوصيل فقط عندما يكون الجهد (V) أكبر من جهد المكثف (V_C). أذا كانت قيمة المقاومة $(R = 0)$، فإن جهد المكثف (V_C) تصل الى القيمة العظمى لجهد المصدر عند نهاية أول نبضة للتيار.

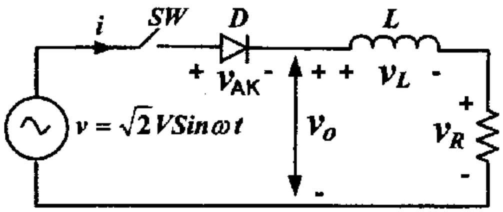
٢-٣-٣- التقويم أحادي الطور نصف موجة بحمل مادي حثي

RL Load Single Phase-Half Wave Rectifier Circuits

من الشكل (٢-١٧) وعند غلق المفتاح (SW) في الدائرة، فإن معادلة الفولتية :-

$$v_L + v_R = v_o = v$$

$$L \frac{di}{dt} + R\, i = V_m \sin \omega t \qquad (2.102)$$



الشكل (٢-١٧-a)

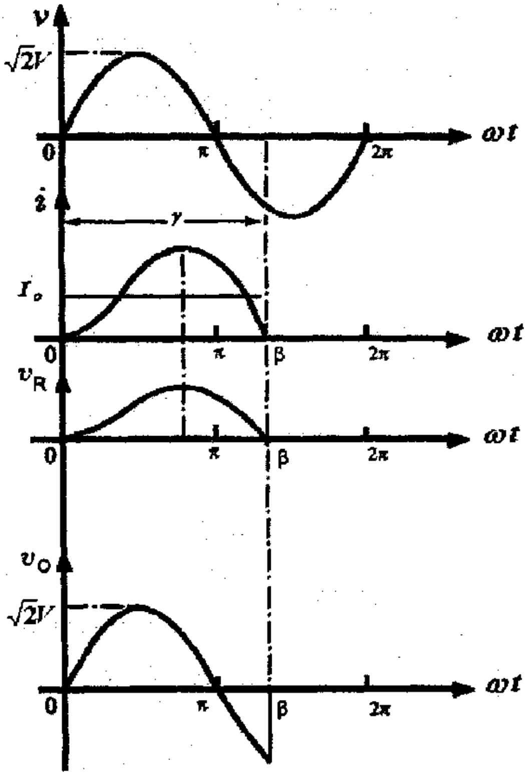
الدائرة الكهربائية لموحد نصف موجة بحمل مادي حثي

عند غلق المفتاح من بداية النصف السالب لموجة الجهد، فإننا نحصل على المركبة الاجبارية (i_F) للتيار:-

$$i_F = \frac{V_m \sin(\omega t - \phi)}{\left[R^2 + \omega L^2\right]^{1/2}} \qquad (2.103)$$

حيث أن :-

$$\phi = tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$



الشكل (٢-١٧-b)

شكل الإشارة الخارجة لموحد نصف موجة بحمل مادي حثي

والممانعة (Z) تساوي:-

$$Z = \left[R^2 + \omega L^2\right]^{1/2}$$

أما المركبة الطبيعية (i_N) للتيار:-

$$i_N = A\, e^{-\left(R/L\right)t} \qquad (2.104)$$

وبالتالي فإن علاقة التيار الكلي اللحظية تساوي:-

$$i = i_F + i_N = \frac{V_m \sin(\omega t - \phi)}{\left[R^2 + \omega L^2\right]^{1/2}} + A e^{-\left(R/L\right)t} \qquad (2.105)$$

من الشروط الابتدائية نجد قيمة الثابت (A) عند $(t = 0)$ فإن $(i = 0)$ وبالتعويض في المعادلة (٢-٩٦) نحصل على:-

$$0 = \frac{V_m \sin(0 - \phi)}{\left[R^2 + \omega L^2\right]^{1/2}} + A$$

$$\therefore A = \frac{V_m \sin\phi}{Z}$$

ويعطي التيار الكلي بالعلاقة:-

$$i = \frac{V_m}{Z}\left[\sin(\omega t - \phi) + e^{-\left(R/L\right)t} \sin\phi\right], \quad 0 < \omega t < \beta \quad (2.106)$$

عندما $(\beta < \omega t < 2\pi)$، فإن $(i = 0)$

وفي نهاية توصيل الديود، فإن $(i = 0)$ و $(\omega t = \beta)$ أو $\left(\frac{\beta}{\omega} = t\right)$، بتعويض هذه القيم في معادلة التيار (٢-٩٧) ينتج:-

$$0 = \sin(\beta - \phi) + e^{-\left(R\beta/\omega L\right)} \sin\phi$$

ومن هذه المعادلة يمكن إيجاد قيم (β) من أجل قيم مختلفة لـ (R, L, ω).

لحساب القيمة المتوسطة للتيار (I_o) من المعادلة الرئيسية:-

$$v_L + v_R = v \Rightarrow v - v_L - v_R = 0$$

وأن

$$v - L\frac{di}{dt} - Ri = 0$$

ومنها يمكن ان نجد قيمة التيار:-

$$i = \frac{v}{R} - \frac{L}{R}\frac{di}{dt}$$

وبالتعويض في القيمة اللحظية لفولتية المصدر والتي تـساوي $(v = V_m \sin \omega t)$، وتعويض بدل (t) بـــ (ωt)تصبح المعادلة:-

$$i = \frac{V_m}{R} \sin \omega t - \frac{\omega L}{R}\frac{di}{d(\omega t)} \qquad (2.107)$$

ولإيجاد القيمة المتوسطة للتيار:-

$$I_o = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\beta} i \; d(\omega t) \qquad (2.108)$$

بالتعويض مكان التيار (i) في المعادلة (٢-١٠٠) ينتج:-

$$I_o = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\beta}\left[\frac{V_m \sin \omega t}{R} - \frac{\omega L}{R}\frac{di}{dt}\right] d(\omega t)$$

في الحالة المستقرة يكون $\left(\frac{di}{d\omega t} = 0\right)$ وبالتالي فإن:-

$$I_o = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\beta}\frac{V_m}{R} \sin \omega t \;\; d(\omega t) = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{V_m}{R}(-\cos \omega t)\right]_0^{\beta}$$

$$I_o = \frac{V_m}{2\pi R}\left[(-\cos\beta + 1)\right] = \frac{V_m}{2\pi R}\left[1 - \cos\beta\right] \qquad (2.109)$$

أما القيمة المتوسطة لفولتية الخرج:-

$$V_o = I_o R = \frac{V_m}{2\pi}(1 - \cos \beta) \qquad (2.110)$$

وبالتالي يتم حساب القيم اللازمة للتصميم من هذه الدائرة بإستخدام تحليل فـــورير، مثل حساب قيم كل من جهد التموج (V_{RI}) وتيار التموج (I_{RI})، القيم الفعالة لجهد وتيار المخرج والقيم المتوسطة لجهد وتيار المخرج.

وهنالك طريقة آخرى يتم بواسطتها الاستغناء عن أجراء الحسابات بواسطة تحليل فورير، وهي طريقة عملية تقوم على أساس أستخدام منحنيات التصميم الخاصة بالعناصر المستخدمة في هذه الدائرة. والتي تمثل قيم كل من القيم الطبيعية (Normalized Value) للقيم الفعالة والقيم المتوسطة للتيار وعلاقتها مع (ϕ) ويتم ذلك بأتباع الخطوات التالية:-

١- نحدد قيم (ϕ) من أجل قيمة محدد لزاوية التوصيل (β)، من الشكل (٢-١٨) على سبيل المثال.

٢- من أجل نفس القيم (ϕ) المحدده في البند الاول، نجد قيم كل من $(I_{NR}\ , I_N)$ من الشكل (٢-١٩).

حيث أن:-

I_N :- تمثل القيمة الطبيعية للقيم المتوسطة للتيار.

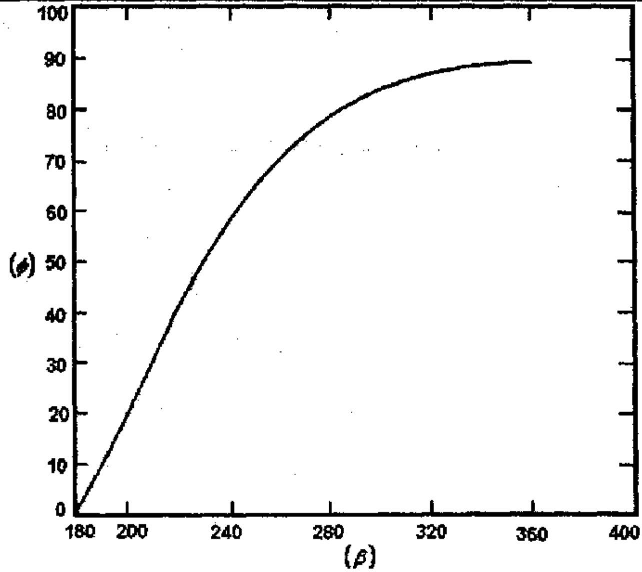
I_{NR} :- تمثل القيمة الطبيعية للقيم الفعالة للتيار.

وتعطى القيمة الطبيعية اللحظية للتيار (i_N) بالعلاقة:-

$$i_N = \frac{i}{i_{max}} = \frac{i}{V_m / Z} = \frac{Z \times i}{V_m} \qquad (2.111)$$

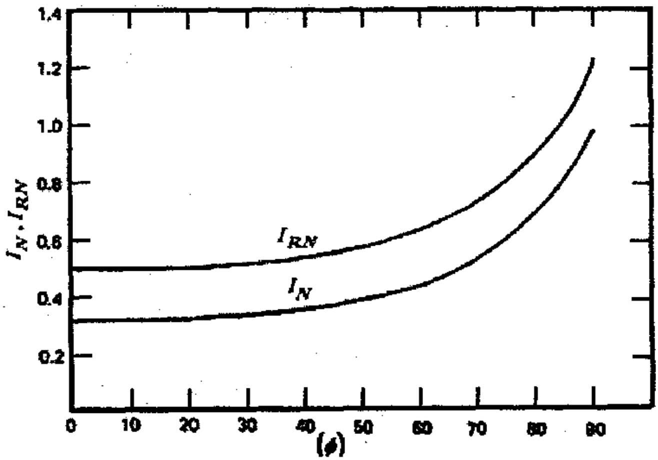
حيث أن علاقة القيمة الطبيعية اللحظية للتيار (i_N) مع (ϕ) مبينة في العلاقة التالية:-

$$i_N = \frac{Z \times i}{V_m} = sin(\omega t - \phi) + e^{-\frac{R.t}{L}} sin\phi \qquad (2.112)$$



الشكل (٢-١٨)

منحنى يمثل العلاقة بين (ϕ) وزاوية التوصيل (β)



الشكل (٢-١٩)

منحنى يمثل العلاقة بين زاوية (ϕ) وكل من التيارات (I_{NR} , I_N)

وتعطى القيمة الطبيعية للقيمة المتوسطة للتيار بالعلاقة:-

$$I_N=\frac{I_o}{I_{max}}=\frac{Z}{V_m}\left[\frac{1}{2\pi}\int_0^{\beta}\frac{V_m}{Z}\left[Sin(\omega t-\phi)+e^{-\frac{R.t}{L}}Sin\phi\right]d\omega t\right]$$

$$I_N=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\beta}\left[Sin(\omega t-\phi)+e^{-\frac{R.t}{L}}Sin\phi\right]d\omega t \qquad (2.112)$$

وتعطى القيمة الطبيعية للقيمة الفعالة للتيار (I_{NR}) بالعلاقة:-

$$I_{NR}=\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\beta}\left[sin(\omega t-\phi)+e^{-\frac{R.t}{L}}sin\phi\right]^2 d\omega t} \qquad (2.113)$$

وتعطى القيمة الفعالة للجهد (V_R) بالعلاقة:-

$$V_R=\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\beta}V_m^2\sin^2(\omega t)\,d\omega t} \qquad (2.114)$$

حالة خاصة:- إذا كانت المقاومة في الدائرة قليلة جداً (مهملة) أي أن $(\omega L>>R)$، فإن $(\phi=90^o)$ والتيار يعطى بالعلاقة:-

$$i=\frac{V_m}{\omega.L}(1-cos\,\omega t) \qquad (2.115)$$

وعلاقة التيار مبينة في الشكل(٢-٢٠).

وتكون القيم المتوسطة للتيار مساوية:-

$$I_o=\frac{V_m}{\omega.L}$$

والتوافقية التي تظهر من التيار هي فقط التوافقية الأولى أو التوافقية الأساسية. ذات القيمة:-

$$I_{1R}=\frac{V}{\omega.L}=\frac{I_o}{\sqrt{2}}$$

وتكون القيمة الفعالة لتيار الحمل:-

$$I_R=\sqrt{I_o^2+I_{1R}^2}=1.225\ I_o$$

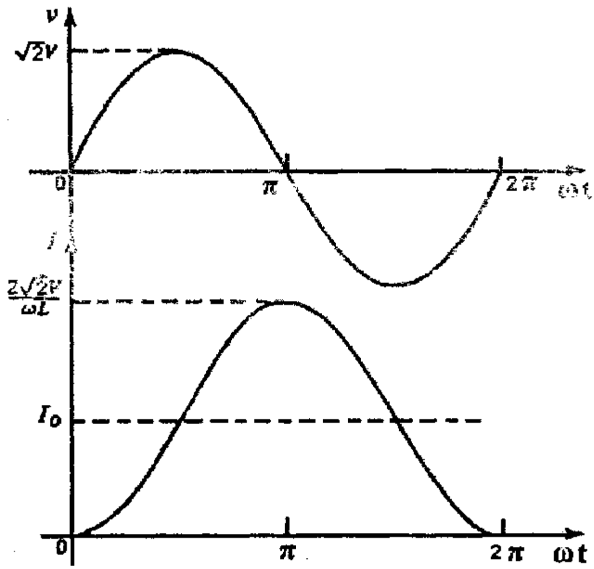
ومن أجل دورة كاملة تكون قيمة $(v_L = v)$، وبالتالي فإن $(V_o = 0)$.

معامل التموج للجهد:-

$$K_v = \frac{V_{1R}}{V_o} = \infty$$

معامل التموج للتيار:-

$$K_i = \frac{I_{1R}}{I_o} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$$



الشكل (٢-٢٠) شكل موجة التيار الخارجة عند أهمال المقاومة

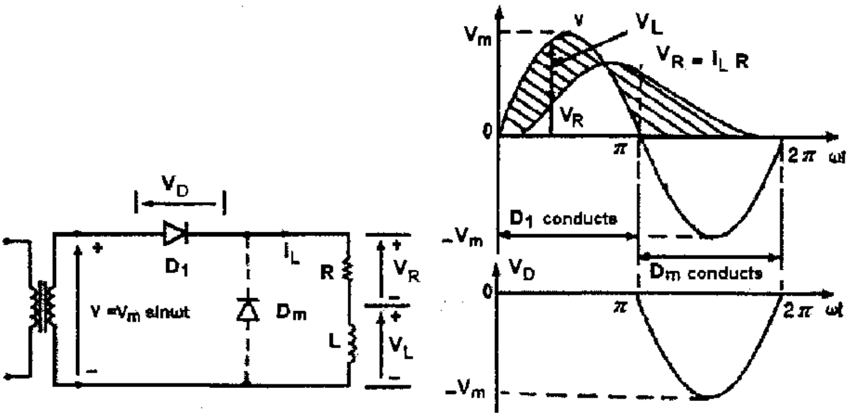
تعاني دوائر التقويم التي تحتوي على حمل حثي من بعض المشاكل أهمها:-

١- التيار المار في الحمل يمكن أن يكون غير متصل (Disconctons).

٢- جهد الخرج ممكن أن يكون سالباً.

٣- التموج في هذا النوع من الدوائر يكون مرتفع.

من أجل التخلص من هذه المشاكل في هذا النوع من الدوائر يتم في العادة توصيل ديود الانطلاق الحر (Free Wheeling Diode) على التوازي مع الحمل، كما في الشكل (٢-٢١).



الشكل (٢-٢١)

شكل الدائرة والموجة الخارجة عند إضافة ديود الانطلاق الحر

تحليل الدائرة:-

في الحالة المستقرة لهذه الدائرة، وأذا تم غلق المفتاح خلال النصف الموجب من الموجة فإن الجهد في الدائرة يعطى بالعلاقة:-

$$L\frac{di}{dt} + R\,i = V_S \qquad (2.116)$$

والحل لهذه المعادلة هو:-

$$i(t) = \frac{V_m}{Z}\left[\sin(\omega t - \phi) + e^{-\frac{R.t}{L}} \sin\phi\right] \qquad (2.117)$$

ونتيجة الفصل والوصل المتكرر للديود نتيجة تردد موجة الـدخل، فإنـه سوف تتكون شحنة إبتدائية على الملف تؤدي الى وجود قيم إبتدائية للتيار المار من خلال الملف. وبالتالي فإن الحل العام للمعادلة التفاضلية يكون من الشكل:-

$$i(t)=\frac{V_m}{Z}\left[\sin(\omega t-\phi)+e^{-\frac{R.t}{L}}\sin\phi\right]+I_o(0)\,e^{-\frac{R.t}{L}} \qquad (2.118)$$

وقيمة التيار عند $(\omega t=\pi)$ تعطى بالعلاقة:-

$$i(t)=\frac{V_m}{Z}\left[\sin(\pi-\phi)+e^{-\frac{R.\pi}{\omega L}}\sin\phi\right]+I_o(0)\;\;e^{-\frac{R.\pi}{\omega L}} \qquad 0<\omega t<\pi$$

وعندما $(\omega t=\pi)$ يصبح ديود الانطلاق الحر ذو انحياز أمامي وسوف يمر تيار خلال الحمل يساوي:-

$$i_o=i_D=I_{o\pi}\;e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t'} \qquad (2.119)$$

حيث أن :-

$$\omega t'=\omega t-\pi$$

وعندما $(\omega t=2\pi)$ أو $(\omega t^{1}=\pi)$ تكون قيمة التيار :-

$$I_{o(2\pi)}=I_{o(\pi)}\,e^{-\left(\frac{R\,\pi}{\omega L}\right)} \qquad (2.120)$$

تزداد قيم (v,i_o) عند بداية كل دورة جديدة الى أن تصل الى $\left(I_{o(\pi)}\right)$ و $\left(I'_{(2\pi)}\right)$. وصولاً الى قيم الحالة الثابتة مثل $\left(I'_{o\,(2\pi)}\right)$ وبالتالي $(\omega t''=\omega t-n\pi)$. حيث أن $\left(\frac{n}{2}\right)$ تمثل عدد الدورات خلال فترة إغلاق المفتاح.

وتعطى القيمة المتوسطة للتيار بالعلاقة:-

$$i_o = i = \frac{V_m}{Z}\sin\left(\omega t'' \ -\phi\right) + A e^{-\frac{R.t''}{L}} \qquad (2.120)$$

يمكن تحديد قيم الثابت (A) من الشروط الابتدائية:-

$$i_o \downarrow_{t''=0} = I'_{o2\pi}$$

تعطى قيم التيار بالعلاقة:-

$$i_o = \frac{V_m}{Z}\sin\left(\omega t'' \ -\phi\right) + \left(I'_{o2\pi} + \frac{V_m}{Z}\sin\phi\right) e^{-\frac{R.t''}{L}} \qquad (2.121)$$

عندما $\left(\omega t'' \ = \pi\right)$ يبدأ ديود الانطلاق الحر بالتوصيل وتبدا قيم التيار بـــالهبوط التدريجي الى أن تصل الى الصفر.

$$i_o \downarrow_{t''=\frac{\pi}{\omega}} = I'_{o\pi} = \frac{V_m}{Z}\sin\phi + \left(I'_{o2\pi} + \frac{V_m}{Z}\sin\phi\right) e^{-\frac{R.\pi}{\omega L}} \qquad (2.122)$$

وخلال نصف الموجة التالية يكون $(v_o = 0)$ والتيار:-

$$i_o = i_D = I'_{o\pi} \ e^{-\left(\frac{R.\left(t'' \ -\pi\right)}{\omega L}\right)} \qquad (2.123)$$

وعند $\left(\omega t'' = 2\pi\right)$ تصبح قيمة الجهد $\left(V_o\right)$ موجبة والتيار يساوي:-

$$i_o \downarrow_{t''=\frac{2\pi}{\omega}} = I'_{o\pi} \ e^{-\left(\frac{R.\pi}{\omega L}\right)} = I'_{o2\pi} \qquad (2.124)$$

وبالتالي فإن:-

$$I''_{o2\pi} = \frac{\frac{V_m}{Z}\sin\phi + \left(1 + e^{-\frac{R.\pi}{\omega L}}\right)}{e^{\frac{R.\pi}{\omega L}} - e^{-\frac{R.\pi}{\omega L}}} \qquad (2.125)$$

$$I'_{o\pi} = I'_{o2\pi} e^{-\left(\frac{R.\pi}{\omega L}\right)}$$

والشكل (٢-٢٢) يبين شكل موجات الخرج لهذه الدائرة. ويمكن تحليل الدائرة بإستخدام سلسلة فورير.

$$V_o = \frac{2V_m}{\pi}\left[\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4}\sin\omega t - \frac{1}{3}\cos 2\omega t - \frac{1}{15}\cos 4\omega t - \frac{1}{70}\cos 6\omega t.........\right]$$

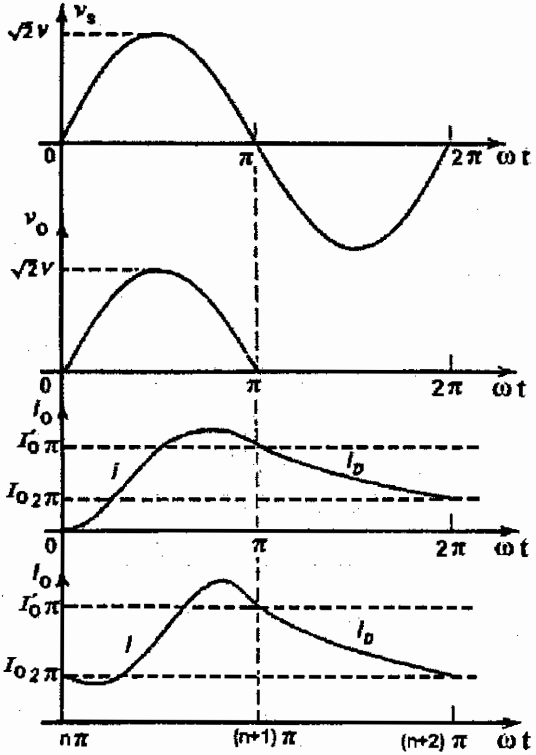
ويمكن الملاحظة من العلاقة أن قيم التوافقية تقل بزيادة رنين التوافق.

وتعطى القيمة المتوسطة للجهد بالعلاقة:-

$$V_o = \frac{V_m}{\pi}$$

والقيم الفعالة للجهد تعطى بالعلاقة:-

$$V_R = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}(V_m \sin\omega t)^2 \, d\omega t} = \frac{V_m}{2} = \frac{V_{rms}}{\sqrt{2}} \qquad (2.125)$$



الشكل (٢-٢٢)

شكل موجات الخرج لدائرة تحتوي على حمل حثي

وجهد التموج يعطي بالعلاقة:-

$$V_{RI} = \sqrt{V_R^2 - V_o^2} = \sqrt{\left(\frac{V_m}{2}\right)^2 - \left(\frac{V_m}{\pi}\right)^2} = V_m\sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{\pi^2}} \qquad (2.126)$$

معامل التموج للجهد يعطى بالعلاقة:-

$$K_v = \frac{V_{RI}}{V_o} = 1.211$$

$$i_o = \frac{2V_m}{\pi}\left[\begin{array}{l}\frac{1}{2R} + \frac{\pi}{4Z_1} Sin(\omega t - \phi_1) - \frac{1}{3Z_2} Cos(2\omega t - \phi_2) \\ - \frac{1}{15Z_4} Cos(4\omega t - \phi_4) ....\end{array}\right] \quad (2.126)$$

حيث أن:-

$$Z_n = \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}$$

$$\phi_n = tan^{-1}\frac{n\omega L}{R} \qquad [rad]$$

القيمة المتوسطة لتيار الخرج تعطى بالعلاقة:-

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{V_m}{\pi \,.\, R} \qquad (2.127)$$

$$i_o = I_o + \sqrt{2}\ I_{1R} Sin(\omega t - \phi_1) - \sqrt{2}\ I_{2R} Cos(2\omega t - \phi_2) - \sqrt{2}\ I_{4R} Cos(4\omega t - \phi_4 ....) \qquad (2.128)$$

حيث أن:-

$$I_{1R} = \frac{1}{2}\frac{V_{rms}}{Z_1} = \frac{1}{2Z_1}\cdot\frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$I_{2R} = \frac{2}{3\pi}\frac{V_{rms}}{Z_2} = \frac{2}{3\pi Z_2}\cdot\frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$I_{4R} = \frac{2}{15\pi}\frac{V_{rms}}{Z_4} = \frac{2}{15\pi Z_4}\cdot\frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

وتيار التموج يعطى بالعلاقة:-

$$I_{RI} = \sqrt{\sum I_{nR}^2}$$

معامل التموج:-

$$K_i = \frac{I_{RI}}{I_o}$$

القيمة الفعالة لتيار الخرج يعطى بالعلاقة:-

$$I_R = \sqrt{I_o^2 + I_{RI}^2}$$

مثال (٢-٢):- للدائرة المبينة في الشكل (٢-٢١). إذا كان جهد المصدر يعطى بالعلاقة $V_S = 110\sqrt{2}\ sin 120\pi t$ ، $L = 30\ mH$ ، $R = 5\ \Omega$.

المطلوب حساب:-

١- القيمة المتوسطة لتيار الحمل(The average value of the load current).

٢- قيمة كل من القيمة الفعالة للتوافقية الأساسية والثانية والرابعة للتيار (i_o).

٣- القيمة الفعالة للتيار (i_o) (The RMs value).

٤- القيمة الجديدة لـ (i_o) في الحالة الثابتة $(I'_{o\pi}\ ,\ I'_{o2\pi})$ باستخدام تحليل فورير.

الحل:-

١- القيمة المتوسطة للتيار

The average value of the load current:-

$$I_o = \frac{V_m}{\pi R} = \frac{\sqrt{2}\ V_{rms}}{\pi R} = \frac{\sqrt{2} \times 110}{\pi \times 5} = 9.9\ A$$

٢- القيمة الفعالة للتيار

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = 12.3\ \Omega$$

The RMs fundamental current:-

$$I_{1R} = \frac{1}{2}\frac{V_{rms}}{Z_1} = \frac{110}{2 \times 12.3} = 4.47\ A$$

$$Z_2 = \sqrt{R^2 + (2\omega L)^2} = 23.2\ \Omega$$

The RMS Second harmonic current:-

$$I_{2R} = \frac{2}{3\pi}\frac{V_{rms}}{Z_2} = \frac{2}{3\pi}\frac{110}{23.2} = 1\ A$$

$$Z_4 = \sqrt{R^2 + (4\omega L)^2} = 45.5\ \Omega$$

The RMS Fourth harmonic current:-

$$I_{4R} = \frac{2}{15\pi}\frac{V_{rms}}{Z_4} = \frac{2}{15\pi}\frac{110}{45.5} = 0.104\ A$$

٣-

$$I_R = \sqrt{I_o^2 + \sum I_{nR}^2} = \sqrt{I_o^2 + I_{1R}^2 + I_{2R}^2 + I_{4R}^2} = 10.9\ A$$

٤- القيمة الصغرى لتيار الخرج $\left(i_o = I'_{o2\pi}\right)$ تكون عند $(\omega t = 0)$، بينما $\left(i_o = I'_{o\pi}\right)$ عند $(\omega t = \pi)$.

$$at\ \ \omega t = 0\ ,\ 2\pi\ ,\ i_o = I'_{o2\pi}$$

$$at\ \ \omega t = \pi\ ,\qquad i_o = I'_{o\pi}$$

$$I'_{o2\pi} \cong I_o - \sqrt{2}\left[I_{1R}\sin\phi_1 + I_{2R}\cos\phi_2 + I_{4R}\cos\phi_4\right]$$

$$I'_{o\pi} \cong I_o + \sqrt{2}\left[I_{1R}\sin\phi_1 - I_{2R}\cos\phi_2 - I_{4R}\cos\phi_4\right]$$

$$\phi_1 = tan^{-1}\frac{\omega L}{R} = 66^o$$

$$\phi_2 = tan^{-1}\frac{2\omega L}{R} = 77.5^o$$

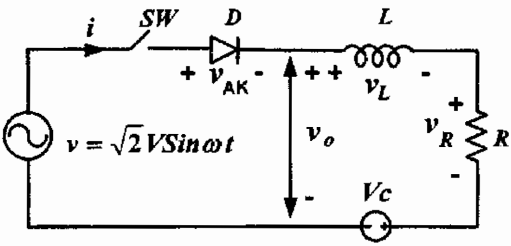
$$\phi_4 = tan^{-1}\frac{4\omega L}{R} = 83.7^o$$

$$I'_{o2\pi} \cong 9.9 - \sqrt{2}\left[4.07 + 0.216 + 0.012\right] = 3.82\ A$$

$$I'_{o\pi} \cong 9.9 + \sqrt{2}\left[4.07 - 0.216 - 0.012\right] = 15.35\ A$$

٢-٣-٤- دائرة تقويم أحادية الطور نصف موجة تحتوي على مقاومة وملف وقوة دافعة كهربائية عكسية:-

للدائرة المبينة في الشكل (٢-٢٣)، عند أغلاق المفتاح خلال النصف السالب يكون هنالك مركبتين للحالة الثابتة:-



الشكل (٢-٢٣)

دائرة تقويم نصف موجة تحتوي على مقاومة وملف وقوة دافعة كهربائية عكسية

١- الأولى ناتجة عن وجود مصدر التغذية وتساوي:-

$$i_{SF} = \frac{V_m}{Z} sin(\omega t - \phi) \qquad (2.129)$$

٢- الثانية ناتجة عن وجود مصدر الجهد (V_C) وتساوي:-

$$i_{CF} = -\frac{V_C}{R}$$

$$\phi = tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

المركبة الاجبارية للتيار تساوي:-

$$i_F = i_{SF} + i_{CF}$$

المركبة الطبيعية للتيار تساوي:-

$$i_N = A\, e^{-\frac{R.t}{L}} \qquad (2.129)$$

ومركبة التيار الكلي تساوي:-

$$i(t) = i_F + i_N = \frac{V_m}{Z}\sin(\omega t - \phi) - \frac{V_C}{R} + A\, e^{-\frac{R.t}{L}} \qquad (2.130)$$

$$, \alpha < \omega t < \alpha + \gamma$$

حيث أن (α): هي الزاوية التي يبدأ عندها التوصيل و (γ) هي زاوية التوصيل.

$$\sin\alpha = \frac{V_C}{V_m} = m$$

من الشروط الابتدائية عندما $(\omega t = \alpha)$ فإن $(i = 0)$ وبالتالي:-

$$0 = \frac{V_m}{Z}\sin(\alpha - \phi) - \frac{V_C}{R} + A\, e^{-\frac{R.\alpha}{\omega.L}}$$

$$A = \left[\frac{V_C}{R} - \frac{V_m}{Z}\sin(\alpha - \phi)\right] e^{-\frac{R.\alpha}{\omega.L}} \qquad (2.131)$$

وبالتعويض في المعادلة الاساسية:-

$$I_N = \frac{Z}{V_m} i = \sin(\omega t - \phi) - \frac{V_C}{R} \times \frac{Z}{V_m}$$
$$+ \left[\frac{V_C}{R} \times \frac{Z}{V_m} - \sin(\alpha - \phi)\right] e^{\frac{R.\alpha}{\omega.L}} \times e^{-\frac{R.t}{L}}$$

إذا كان:-

$$m = \frac{V_C}{V_m} \qquad , \qquad \cos\phi = \frac{R}{Z}$$

فإن:-

$$I_N = \sin(\omega t - \phi) - \frac{m}{\cos\phi} + \left[\frac{m}{\cos\phi} - \sin(\alpha - \phi)\right] e^{\frac{R.\alpha}{\omega.L}} \times e^{-\frac{R.t}{L}} \qquad (2.132)$$

على اعتبار أن:-

$$B=\left[\frac{m}{\cos\phi}-\sin(\alpha-\phi)\right]e^{\frac{R.\alpha}{\omega.L}} \qquad (2.133)$$

فإن:-

$$I_N=\frac{i}{I_m}=\sin(\omega t-\phi)-\frac{m}{\cos\phi}+Be^{-\frac{R.t}{L}} \qquad (2.134)$$

وعند نهاية فترة التوصيل عند $(\omega t=\alpha+\gamma)$، فإن، $(i=0)$. وبالتعويض في المعادلة السابقة نجد أن:-

$$I_N=\sin(\omega t-\phi)-\frac{m}{\cos\phi}+Be^{-\frac{R.t}{L}}$$

$$0=\sin(\alpha+\gamma-\phi)-\frac{m}{\cos\phi}+Be^{-\frac{R.(\alpha+\gamma)}{\omega.L}} \qquad (2.135)$$

$$0=\sin(\alpha+\gamma-\phi)-\frac{m}{\cos\phi}+\left[\frac{m}{\cos\phi}-\sin(\alpha-\phi)\right]e^{\frac{R.\alpha}{\omega.L}}\times e^{-\frac{R.(\alpha+\gamma)}{\omega.L}}$$

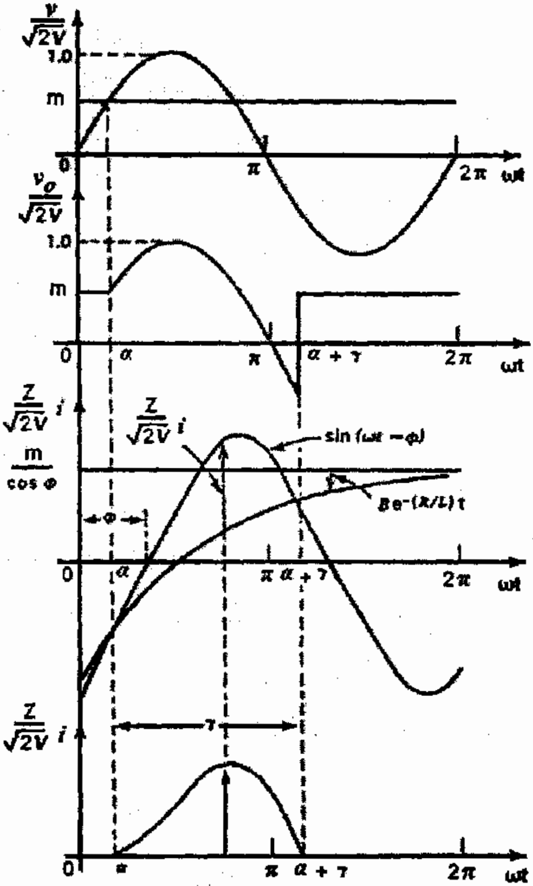
$$0=\sin(\alpha+\gamma-\phi)-\frac{m}{\cos\phi}+\left[\frac{m}{\cos\phi}-\sin(\alpha-\phi)\right]\times e^{-\frac{R.\gamma}{\omega.L}}$$

$$\frac{m}{\cos\phi}-\sin(\alpha+\gamma-\phi)=\left[\frac{m}{\cos\phi}-\sin(\alpha-\phi)\right]e^{-\frac{\gamma}{\tan\phi}}$$

$$e^{-\frac{\gamma}{\tan\phi}}=\frac{\frac{m}{\cos\phi}-\sin(\alpha+\gamma-\phi)}{\frac{m}{\cos\phi}-\sin(\alpha-\phi)} \qquad (2.136)$$

إشارات المخرج لهذه الدائرة مبينة في الشكل (٢-٢٤). في أي دائرة من

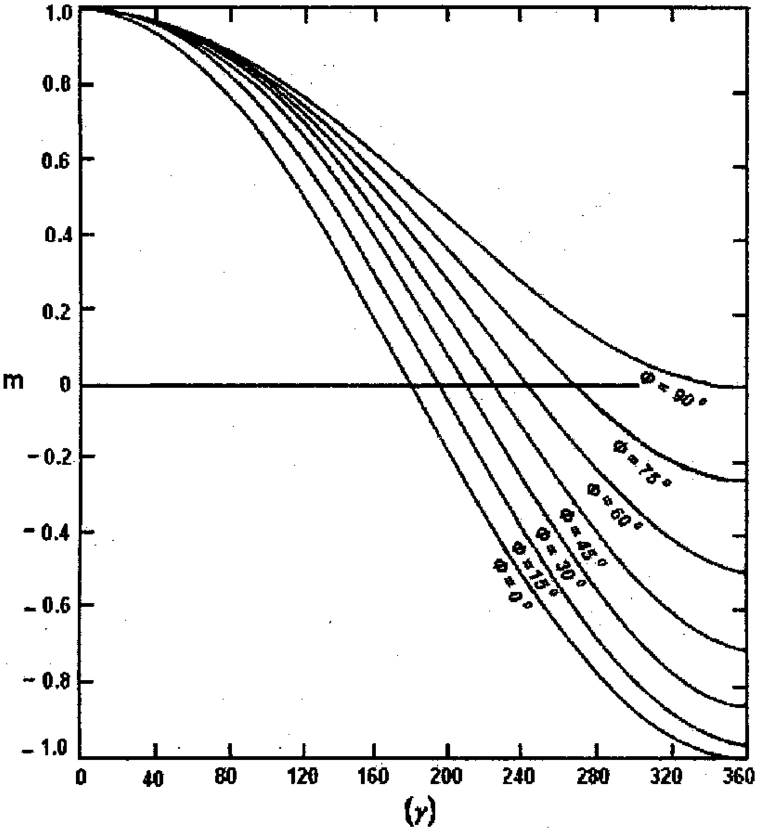
هذا النوع تكون قيم كل من $\left(m=\frac{V_C}{V_m}\ ,\ \alpha\ ,\ \phi\right)$ معروفة، وبالتالي يمكن حل المعادلة السابقة من أجل تحديد قيم (γ) ومن ثم حساب قيمة (I_N).



الشكل (٢-٢٤)

إشارات الخرج لدائرة تقويم نصف موجة تحتوي على مقاومة وملف وقوة دافعة كهربائية عكسية

والطريقة الأسهل هي أستخدم منحنيات العلاقات بين هذه القيم مــن أجــل تحديــد قيمة(I_N). وعلاقة (γ) مع (m) من أجل قيم مثالية لــ (ϕ)، الشكل (٢-٢٥).



الشكل (٢-٢٥)

منحنى يبين علاقة (γ) مع (m) من أجل قيم مثالية لــ (ϕ)

تحديد الجهود والتيارات في الدائرة:-

١- الجهود على طرفي الملف:- خلال دورة واحدة تكون القيمة المتوسطة للجهد على طرفي الملف تساوي الصفر:-

$$\int_0^{2\pi} V_L \; d(\omega t) = 0$$

٢- القيمة المتوسطة للجهد على طرفي المقاومة (R) تساوي:-

$$\begin{aligned} V_{Res} &= \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma}\left[V_m \sin\omega t - V_C\right]d(\omega t) \\ &= \frac{V_m}{2\pi}\left[\sqrt{1-m^2}\,(1-\cos\gamma) - m(\gamma - \sin\gamma)\right] \end{aligned} \qquad (2.137)$$

٣- القيمة المتوسطة لتيار الحمل:-

$$I_o = \frac{V_{Res}}{R} = \frac{V_{Res}}{Z\cos\phi} \qquad (2.138)$$

وبالتالي فإن:-

$$I_N = \frac{Z}{V_m}.I_o = \frac{1}{2\pi\cos\phi}\left[\sqrt{1-m^2}\,(1-\cos\gamma) - m(\gamma - \sin\gamma)\right] \qquad (2.139)$$

وعلاقة (I_N) مع (m) من أجل قيم مختلفة لـــ (ϕ) مبينة في الشكل (٢-٢٦).

٤- القيم المتوسطة للجهد على طرفي الحمل:-

$$V_o = R.I_o + V_C$$

٥- القيمة الفعالة للجهد على طرفي الحمل:-

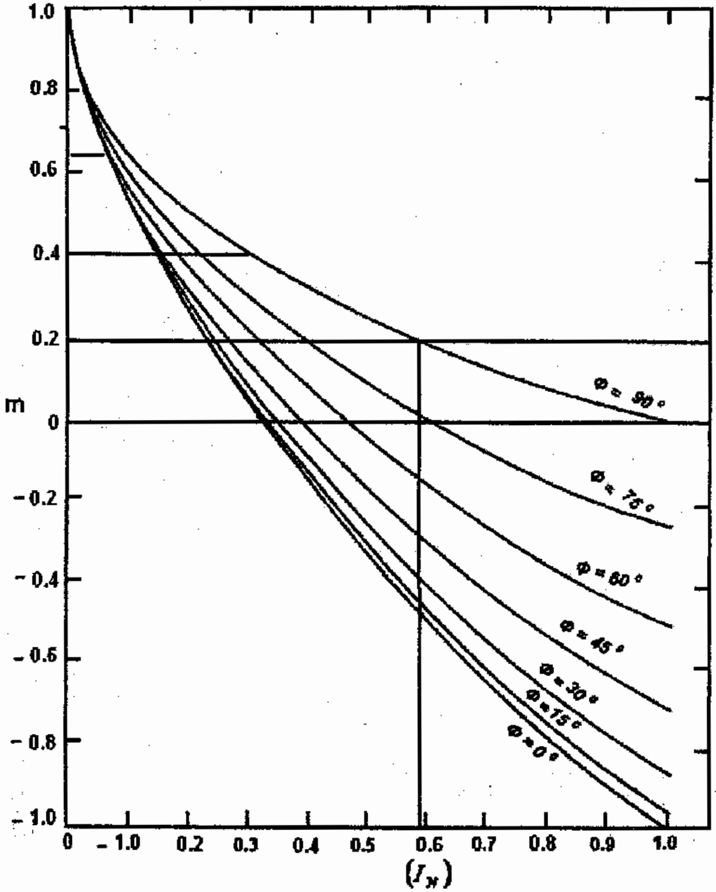
$$V_R = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\left[\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma}\left[V_m \sin\omega t\right]^2 d(\omega t) + \int_{\alpha+\gamma}^{2\pi+\alpha} V_C^2 \, d\omega t\right]} \qquad (2.140)$$

٦- جهد التموج:-

$$V_{Rl} = \sqrt{V_R^2 - V_o^2}$$

٧- معامل التموج للجهد:-

$$K_v = \frac{V_{RI}}{V_o}$$



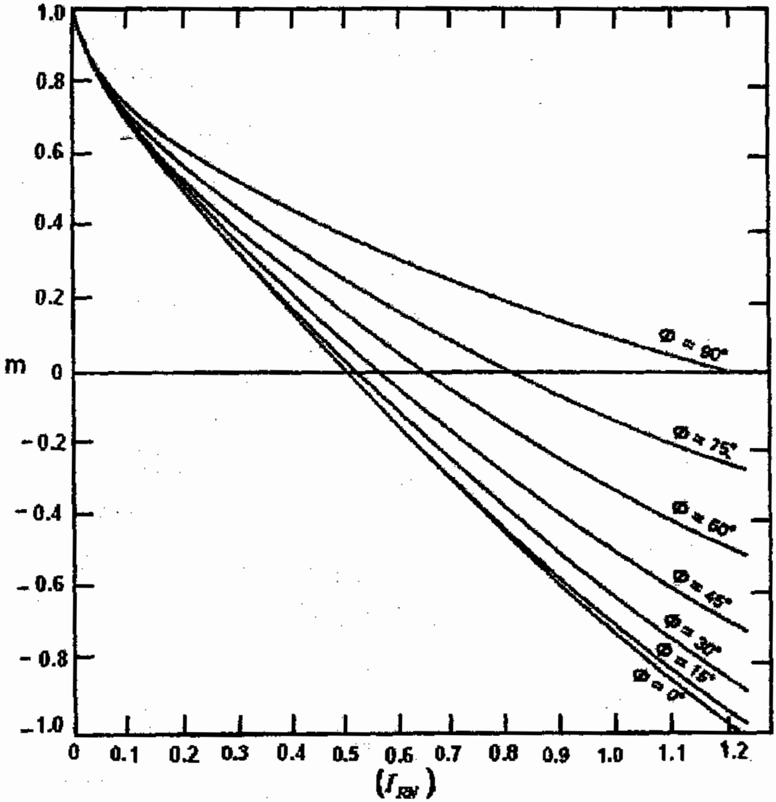
الشكل (٢-٢٦)

منحنى يبين علاقة (I_N) مع (m) من أجل قيم لـ (ϕ)

٨- القيمة الطبيعية (Normalized) للقيمة الفعالة للتيار:-

$$I_{RN} = \frac{Z.I_R}{V_m} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma}\left(\frac{Z \times i}{V_m}\right)^2 d(\omega t)} \qquad (2.141)$$

علاقة (m) مع (I_{RN}) من أجل قيم مختلفة لـ(ϕ) مبينة في الشكل (٢-٢٧).



الشكل (٢-٢٧)

منحني يبين علاقة (m) مع (I_{RN}) من أجل قيم مختلفة لـ(ϕ)

٩- تيار التموج:-

$$I_{RI} = \sqrt{\sum I_{nR}^2} = \sqrt{I_R^2 - I_o^2}$$

١٠- معامل التموج للتيار:-

$$K_i = \frac{I_{RI}}{I_o}$$

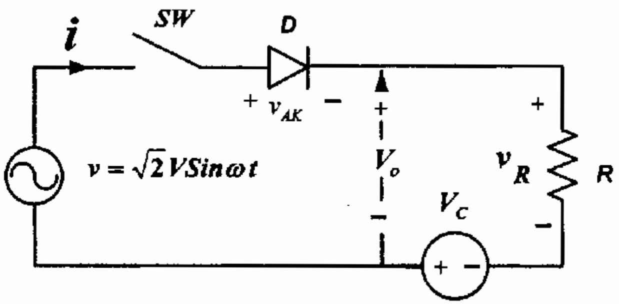
لهذا النوع من الدوائر هنالك حالتين خاصتين:-

أ- إذا كانت قيمة المفاعلة الحثية صغيرة جداً (مهملة) $(L=0)$، كما هو مبين في الشكل(٢-٢٨). فإن قيمة التيار في هذه الحالة تساوي:-

$$i = \frac{V_m}{R} Sin\,\omega t - \frac{V_C}{R} \qquad \alpha < \omega t < \alpha + \gamma$$

بضرب طرفي المعادلة بـــ $\left(\frac{R}{V_m}\right)$ نحصل على:-

$$\frac{R.i}{V_m} = Sin\,\omega t - \frac{V_C}{R} \times \frac{R}{V_m} = Sin\,\omega t - m \qquad (2.142)$$



الشكل(٢-٢٨)

مقوم نصف موجة بعد إهمال قيمة المحاثة

وشكل هذا التيار مبين في الشكل (٢-٢٩).

$$\gamma = \pi - 2\alpha$$

$$I_o = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma}\frac{V_m}{R}(Sin\omega t - m)d\omega t$$
$$= \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi-\alpha}\frac{V_m}{R}(Sin\omega t - m)d(\omega t) \qquad (2.143)$$

$$I_N = \frac{R}{V_m}I_o = \sqrt{1-m^2} - m\cos^{-1}m \qquad (2.144)$$

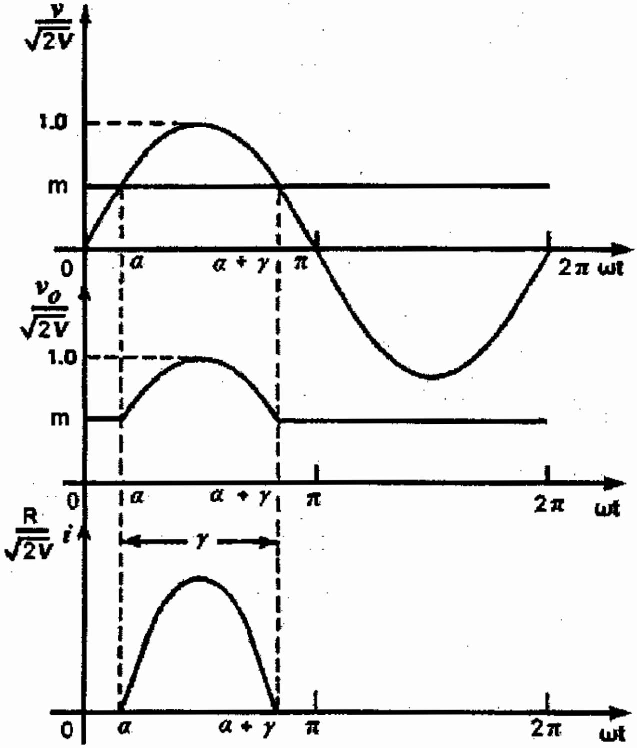
القيمة المتوسطة لجهد الخرج تعطي بالعلاقة:-

$$V_o = R\,.I_o + V_C$$

$$v_o = V_C \qquad , \quad 0 < \omega t < \alpha$$

$$v_o = V_m \sin\omega t \qquad , \quad \alpha < \omega t < \alpha + \gamma$$

$$v_o = V_C \qquad , \quad \pi - \alpha < \omega t < 2\pi$$



الشكل (٢-٢٩)

شكل التيار الخارج لمقوم نصف موجة بعد إهمال قيمة المحاثة

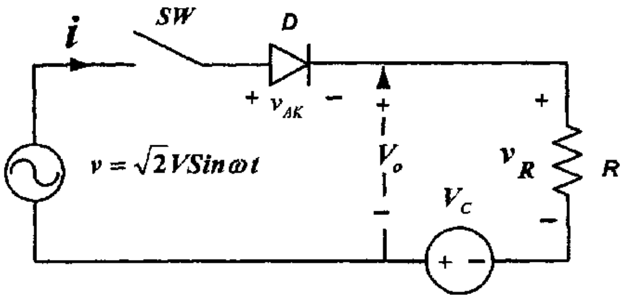
القيمة الفعالة لجهد الخرج تساوي:-

$$V_R = \sqrt{V_C^2 + \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi-\alpha}\left[\left(V_m \sin\omega t\right)^2 - V_C^2\right] d(\omega t)} \qquad (2.145)$$

القيمة الفعالة لتيار الخرج تساوي:-

$$I_R = \sqrt{\frac{1}{2\pi R^2}\int_{\alpha}^{\pi-\alpha}\left[V_m \sin\omega t - V_C\right]^2 d(\omega t)} \qquad (2.146)$$

مثال(٢-٣):- للدائرة الكهربائية المبينة في الشكل أدناه، جهد المصدر يساوي $\left(v = 110\sqrt{2}\ Sin 120\pi t \ \ (V)\right)$ وقيمة المقاومة $(R = 1\ \Omega)$ وجهد القوة الدافعة الكهربائية $(V_C = 100\ V)$. إذا تم إغلاق المفتاح خلال النصف السالب من الموجة. المطلوب حساب:-



١- حساب قيمة زاوية (α) (زاوية بداية التوصيل للديود).

The angle (α) at which diode D starts to conduct.

٢- زاوية التوصيل (γ) The conduction angle .

٣- القيمة المتوسطة للتيار (i) The average value of current.

٤- القيمة الفعالة للتيار (i) The RMS value of current.

٥- القدرة المزودة من مصدر الجهد المتناوب The power delivered by the ac source

٦- معامل القدرة لمصدر التغذية The power factor at the ac source.

الحل:-

١- $$\alpha = Sin^{-1} m = Sin^{-1}\frac{V_C}{V_m} = Sin^{-1}\frac{100}{110\sqrt{2}} = 40^o = 0.697\, rad$$

٢- $$\gamma = \pi - 2\alpha = \pi - 2\times 0.697 = 1.75\ rad = 100^o$$

٣-

$$I_o = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi-\alpha}\frac{V_m}{R}(Sin\omega t - m)d\omega t$$

$$= \frac{1}{2\pi}\int_{0.697}^{\pi-0697}\frac{100\sqrt{2}}{1}\left(Sin120\pi.t - \frac{100}{110\sqrt{2}}\right)d(\omega t) = 10.2 \ \ A$$

٤-

$$I_R = \sqrt{\frac{1}{2\pi R^2}\int_{\alpha}^{\pi-\alpha}\left[V_m \ sin\,\omega t - V_C\right]^2 \ d(\omega t)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2\pi 1^2}\int_{0.697}^{\pi-0.697}\left(110\sqrt{2}\right)^2\left[sin\,120\pi t - \frac{100}{110\sqrt{2}}\right]^2 \ d(\omega t)} = 21.2 \ \ A$$

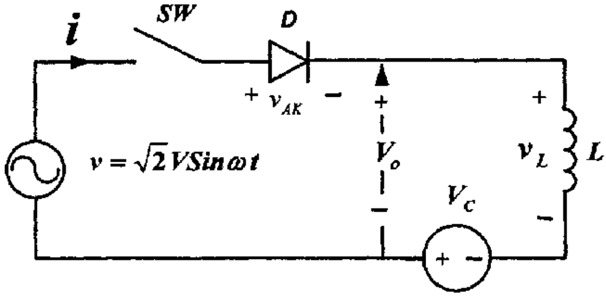
٥-

$$P = R \ \ I_R^2 + V_C \,.I_o = 1\times(21.2)^2 + 100\times 10.2 = 1469 \ \ watt$$

٦-

$$Power \ \ Factor = P.F = \frac{P}{V\,.I_R} = \frac{1469}{110\times 21.2} = 0.63$$

ب – إذا كانت قيمة المقاومة (R) صغيرة جداً (مهملة) $(R=0)$، كما هو مبين في الشكل (٢–٣٠).



الشكل (٢-٣٠)

مقوم نصف موجة بعد إهمال قيمة المقاومة

في هذه الحالة فإن قيمة التيار المار في الدائرة هي عبارة عن مجموع مركبتين، الاولى ناتجة عن مصدر الجهد $(V(t))$ والثانية ناتجة عن مصدر الجهد (V_C).

المركبة الأولى لهذه الحالة تحسب من المعادلة التالية:-

$$V_m \sin\omega t = L\frac{di_S}{dt} = \omega . L\frac{di_S}{d\omega t} \Rightarrow \frac{di_S}{d\omega t} = \frac{V_m}{\omega L}\sin\omega t \qquad (2.147)$$

$$i_S = \frac{V_m}{\omega L}\int_{\alpha}^{\omega t}\sin(\omega t)d\omega t = \frac{V_m}{\omega L}[\cos\alpha - \cos\omega t] \qquad (2.148)$$

وقيمة التيار (i_S) تساوي:-

$$i_S = 0 \qquad , \ \omega t = \alpha$$

$$i_S = 0 \qquad , \ \omega t = 2\pi - \alpha$$

المركبة الثانية المتعلقة بالجهد (V_C) ، يمكن كتابة المعادلة التالية:-

$$-V_C = L\frac{di_C}{dt} = \omega . L\frac{di_C}{d\omega t} \Rightarrow \frac{di_C}{d\omega t} = -\frac{V_C}{L} \qquad (2.149)$$

وقيمة التيار (i_C) تساوي:-

$$i_C = -\frac{V_C}{\omega L}\int_{\alpha}^{\omega t} d\omega t = -\frac{V_C}{\omega L}[\omega t - \alpha] \qquad (2.150)$$

وتكون القيمة الكلية للتيار مساوية:-

$$i = i_S + i_C = \frac{V_m}{\omega L}\left[\cos\alpha - \cos\omega t - m(\omega t - \alpha)\right] \qquad (2.151)$$

ولكن عندما $(\omega t = \alpha)$ فإن:-

$$\frac{di_S}{dt} = \frac{V_m}{L}\sin\alpha \qquad , \sin\alpha = \frac{V_C}{V_m}$$

$$\frac{di_S}{dt} = \frac{V_C}{L} = \frac{V_m}{L}\sin\alpha$$

وكذلك:-

$$\frac{di_C}{dt} = -\frac{V_C}{L}$$

وبالتالي فإن:-

$$\frac{di_S}{dt} = -\frac{di_C}{dt}$$

وهذه التيارات مبينة في الشكل(٢-٣١).

القيمة المتوسطة للجهد على طرفي الملف خلال دورة واحدة يساوي:-

$$\int_0^{2\pi} v_L \; d\omega t = 0 \qquad (2.152)$$

قيمة التيار $(i = 0)$ عندما $(\omega t = \alpha + \gamma)$، بالتالي وبالتعويض في المعادلة الكلية للتيار تصبح المعادلة:-

$$i = i_S + i_C = \frac{V_m}{\omega L}\left[\cos\alpha - \cos\omega t - m(\omega t - \alpha)\right] \qquad (2.153)$$

نجد أن:-

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma) - m\gamma = 0 \qquad (2.154)$$

إذا كانت قيمة $(R = 0)$ فإن $(\phi = 90^o)$، بالتالي فإن $(\cos\phi = 0)$ و $(\sin\phi = 1)$. نحسب قيمة التيار (I_o) من العلاقة:-

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \frac{V_m}{\omega.L} (\cos\alpha - \cos\omega t - m(\omega t - \alpha)) d\omega t \qquad (2.155)$$

وبالتالي فإن:-

$$I_N = \frac{\omega.L}{V_m}.I_o = \frac{1}{2\pi}\left[\sqrt{1-m^2}(\gamma - \sin\gamma) + m(1-\cos\gamma) - \frac{m\gamma^2}{2}\right] \qquad (2.156)$$

القيمة المتوسطة لجهد الخرج تساوي:-

$$v_o = v_C \qquad , \; 0 < \omega t < \alpha$$

$$v_o = V_m \sin\omega t \qquad , \; \alpha < \omega t < \alpha + \gamma$$

$$v_o = V_C \qquad , \; \alpha + \gamma < \omega t < 2\pi$$

بما أن القيمة المتوسطة للجهد على الملف تساوي صفراً فإن القيمة المتوسطة لجهد الخرج تساوي:-

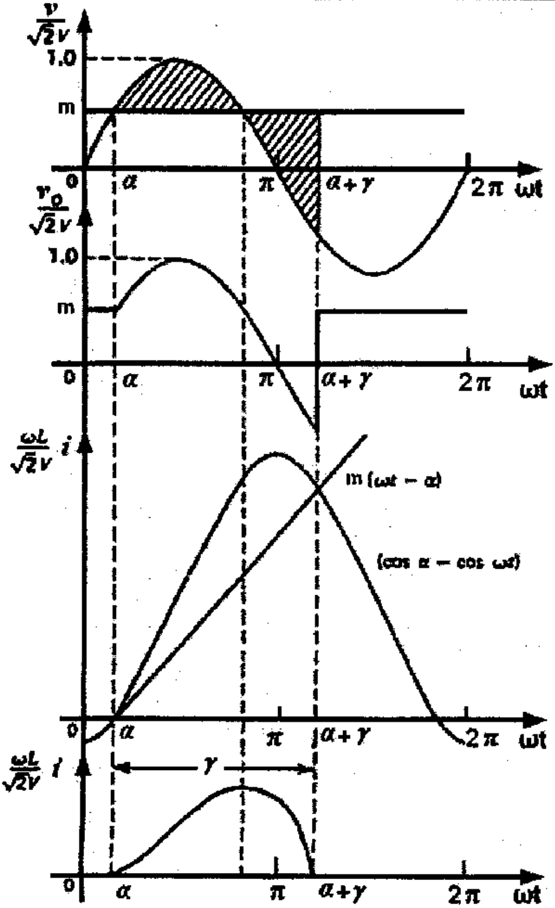
$$V_o = V_C$$

القيمة الفعالة لجهد الخرج تعطى بالعلاقة:-

$$V_R = \sqrt{V_C^2 + \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \left[V_m \sin\omega t - V_C^2 \right]^2 d\omega t} \qquad (2.157)$$

القيمة الفعالة لتيار الخرج تعطى بالعلاقة:-

$$I_R = \frac{V_m}{\omega.L} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} [\cos\alpha - \cos\omega t - m(\omega t - \alpha)]^2 \; d\omega t} \qquad (2.158)$$



الشكل(٢-٣١)

شكل إشارات التيار الخارجة لمقوم نصف موجة بعد إهمال قيمة المقاومة

مثال (٢-٤):- خمس بطاريات $(12V)$ موصولة مع بعضها على التوالي، ويتم شحنها من مصدر جهد أحادي الطور متناوب جهده $(110\ V)$ وبتردد $(50\ Hz)$.

باستخدام دائرة تقويم أحادي الطور نصف موجة مع حمل حثـي $(L = 30\ mH)$.

المطلوب حساب:-

١- القيمة المتوسطة للتيار والقدرة المزودة للبطاريات، أذا كانــت القــوة الدافعــة الكهربائية لكل بطارية تساوي $(6\ V)$.

٢- القيمة المتوسطة للتيار والقوة المزودة الى البطاريات، أذا كانت القوة الدافعــة الكهربائية لكل بطارية تساوي $(6\ V)$.

٣- القيمة المتوسطة للتيار والقوة المزودة الى البطاريات، أذا كانت القوة الدافعــة الكهربائية لكل بطارية مهملة.

الحل:-

-١

$$\alpha = Sin^{-1}\ m = Sin^{-1}\frac{V_C}{V_m}$$

$$V_C = 6\times 5 = 30\ V \qquad , \qquad V_m = \sqrt{2}\times 110 = 110\sqrt{2}\ V$$

يتم حساب قيمة الزاوية (γ) من حل المعادلة:-

$$Cos\alpha - Cos(\alpha+\gamma) - m\ \gamma = 0$$

$$I_o = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma}\frac{V_m}{\omega.L}\left(Cos\alpha - Cos\omega t - m(\omega t - \alpha)\right)d\omega t$$

أو من المعادلة:

$$I_N = \frac{\omega.L}{V_m}.I_o = \frac{1}{2\pi}\left[\sqrt{1-m^2}(\gamma - Sin\gamma) + m(1-Cos\gamma) - \frac{m\gamma^2}{2}\right]$$

أو تم حساب قيمة (I_N) من المنحنيات من أجل $(\phi = 90^o)$ فإن:-

$$m = 0.192 \qquad , \qquad \gamma = 264^o \qquad , \qquad I_N = 0.57$$

وبالتالي فإن القيمة المتوسطة للتيار تساوي:-

$$I_o = I_m \times I_N = \frac{V_m}{\omega .L} I_N$$

$$The\ average\ current \quad I_o = \frac{V_m}{\omega .L} I_N = \frac{\sqrt{2}\ \times 110}{0.377 \times 30} \times 0.57 = 7.8\ A$$

$$Power = V_C \times I_o = 30 \times 7.8 = 234\ V$$

٢-

$$V_C = 5 \times 13 = 65\ V \quad , \quad V_m = \sqrt{2} \times 110\ V \quad , \quad m = \frac{V_C}{V_m} = 0.416$$

من المنحنيات من أجل $(\phi = 90^o)$ فإن:-

$$\gamma = 212^o \quad , \quad I_N = 0.26$$

$$The\ average\ current \quad I_o = \frac{V_m}{\omega .L} I_N = \frac{\sqrt{2}\ \times 110}{0.377 \times 30} \times 0.26 = 3.56\ A$$

$$Power = V_C \times I_o = 30 \times 3.56 = 231\ V$$

٣-

$$V_C = 0 \quad , \quad m = 0 \quad , \quad \gamma = 360^o \quad , \quad I_N = 1$$

$$The\ average\ current \quad I_o = \frac{V_m}{\omega .L} I_N = \frac{\sqrt{2}\ \times 110}{0.377 \times 30} \times 1 = 13.7\ A$$

$$Power = 0$$

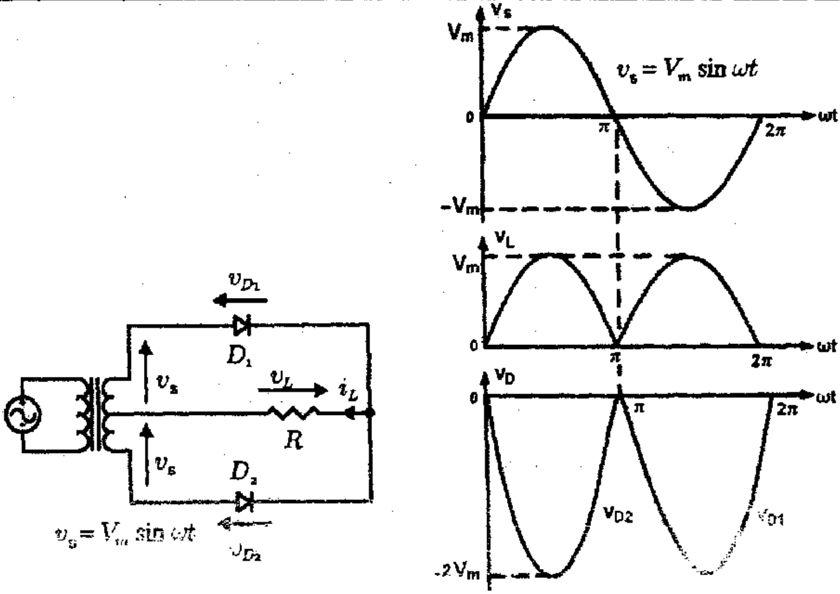
٢-٣-٥- التقويم أحادي الطور موجة كاملة

Single Phase-Full Wave Rectifiers

ويقسم الى قسمين أساسيين هما :-

١- تقويم موجة كاملة باستخدام محول نقطة وسطية(Center Tapped):-

الدائرة الكهربائية وشكل موجة المخرج لهذا المقوم مبينة في الشكل من اجل الحمل المادي (٢-٣٢).



الشكل (٢-٣٢)

مقوم موجة كاملة أحادي الطور وشكل الموجة الخارجة

القيمة المتوسطة للجهد على أطراف الحمل تعطى بالعلاقة :-

$$V_o = V_{dc} = \frac{2}{2\pi}\int_0^{\pi} V_m \ Sin\,\omega t \ d\omega t = \frac{2\,V_m}{\pi}$$

$$V_o = 0.6366\,V_m \qquad (2.159)$$

إذا كان الحمل للدائرة حملاً ماديا فان القيمة المتوسطة للتيار خلال الحمل تعطى بالعلاقة:-

$$I_o = I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{2\,V_m}{\pi . R} = \frac{0.6366 V_m}{R} \qquad (2.160)$$

القيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل تعطى بالعلاقة:-

$$V_R = V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{2\pi}\int_0^{\pi}(V_m \ Sin \ \omega t)^2 \, d\omega t}$$

$$V_R = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707 \, V_m \qquad (2.161)$$

$$I_R = I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{0.707 \ V_m}{R} \qquad (2.162)$$

$$P_{dc} = \frac{(0.6366 \ V_m)^2}{R} \qquad (2.163)$$

$$P_{ac} = \frac{(0.707 \ V_m)^2}{R}$$

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = 81 \ \%$$

$$F.F = \frac{0.707 \ V_m}{0.6366 \ V_m} 1.11$$

$$RF = \sqrt{(F.F)^2 - 1} = \sqrt{(1.11)^2 - 1} = 0.482$$

$$V_S = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707 \ V_m$$

$$I_s = \frac{0.5 \, V_m}{R}$$

$$P_{VA} = 2 \, V_S \cdot I_S$$

$$TUF = \frac{(0.6366)^2}{2 \times 0.707 \times 0.5} = 0.5732$$

$$PIV = 2 \, V_m$$

مثال (٢-٥):- المقوم المبين في الشكل (٢-٣٢) موصـــول مـــع حمـــل (RL). باستخدم سلسلة فورير أوجد الفولتية الخارجة $(v_L(t))$ وتيار الحمل $(i_L(t))$. إذا

كانت $\left(V_m = 170\ V\right)$، والتردد $\left(f = 60\,Hz\right)$، والمقاومة $\left(R = 500\Omega\right)$. فأوجد قيمة المحاثة $\left(L\right)$ التي تجعل معامل التموج يساوي $\left(5\%\right)$ من تيار $\left(I_o\right)$.

الحل:–

باستخدام سلسلة فورير يمكن إيجاد الفولتية الخارجة من العلاقة:

$$v_L(t) = V_o + \sum_{n=2,4\ldots}^{\infty}\left(a_n\, Cos\omega t + b_n Sinn\omega t\right)$$

حيث أن:–

$$V_o = V_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} v_L(t)\, d(\omega t) = \frac{2}{2\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin \omega t\ d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} v_L \cos n\omega t\ d(\omega t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin \omega t \cos n\omega t\, d(\omega t)$$

$$= \frac{4V_m}{\pi}\sum_{n=2,4\ldots}^{\infty}\frac{-1}{(n-1)(n+1)}$$

$$a_n = 0 \qquad , for\ \ n = 1,3,5,\ldots\ldots\ldots$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} v_L \sin n\omega t\ d(\omega t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin \omega t \sin n\omega t\, d(\omega t) = 0$$

باستبدال قيم $\left(a_n\ ,b_n\right)$، نحصل على الفولتية الخارجة من العلاقة:–

$$v_L(t) = \frac{2V_m}{\pi} - \frac{4V_m}{3\pi}\cos 2\omega t - \frac{4V_m}{15\pi}\cos 4\omega t - \frac{4V_m}{35\pi}\cos 6\omega t - \ldots\ldots$$

وتكون قيمة الممانعة الكلية:–

$$Z = R + j(n\omega L) = \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}$$

زاوية فرق الطور تساوي:–

$$\theta_n = tan^{-1}\frac{n\omega L}{R}$$

والتيار اللحظي للحمل:–

$$i\ (t)=I_o-\frac{4V_m}{\pi}\left[\frac{1}{3Z_2}Cos(2\omega t-\theta_2)-\frac{1}{15Z_4}Cos(4\omega t-\theta_4)+........\right]$$

حيث أن:-

$$I_o=\frac{V_o}{R}=\frac{2V_m}{\pi R}$$

وبما أن القيم الفعالة لكل توافقية للتيار تعطى بالعلاقة:-

$$I_R=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$I_{2R}=\frac{4V_m}{\sqrt{2}\ \pi}\cdot\frac{1}{3Z_2}\quad ;\ Z_2=\sqrt{R^2+(2\omega L)^2}\quad ;\ \phi_2=tan^{-1}\frac{2\omega L}{R}$$

$$I_{4R}=\frac{4V_m}{\sqrt{2}\ \pi}\cdot\frac{1}{15Z_4}\quad ;\ Z_4=\sqrt{R^2+(4\omega L)^2}\quad ;\ \phi_4=tan^{-1}\frac{4\omega L}{R}$$

$$I_{6R}=\frac{4V_m}{\sqrt{2}\ \pi}\cdot\frac{1}{35Z_6}\quad ;\ Z_6=\sqrt{R^2+(6\omega L)^2}\quad ;\ \phi_6=tan^{-1}\frac{6\omega L}{R}$$

نحصل على القيمة الفعالة لتيار التموج من معادلة التيار اللحظي:-

$$I_R=\frac{-(4V_m)}{\sqrt{2}\ \ \pi}\left[\left(\frac{1}{3}\right)\frac{1}{Z_2}+\left(\frac{1}{15}\right)\frac{1}{Z_4}+\left(\frac{1}{35}\right)\frac{1}{Z_6}.........\right]$$

معامل التموج من أجل قيم التوافقية الأساسية يساوي:

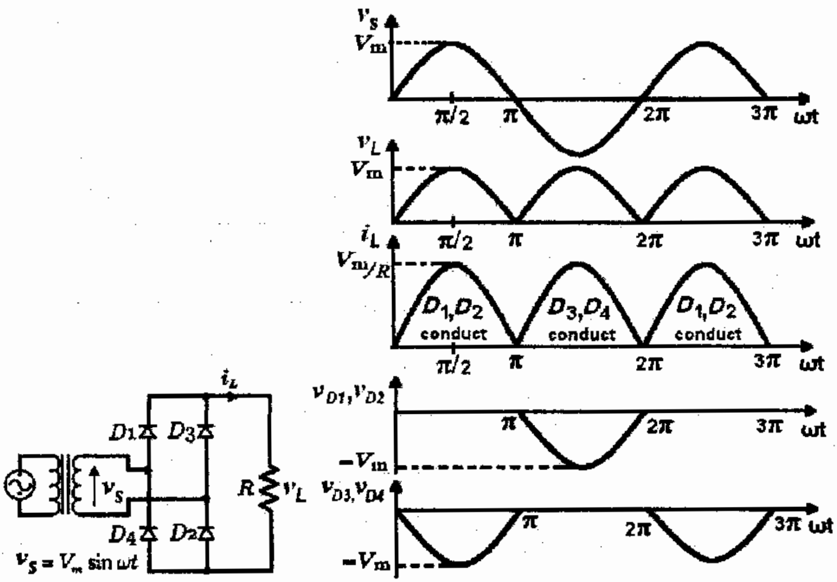
$$RF=\frac{I_{2R}}{I_o}=\frac{\frac{4V_m}{\sqrt{2}\ \ \pi}\cdot\frac{1}{3}\cdot\frac{1}{\sqrt{R^2+(2\omega\ L)^2}}}{2V_m/\pi\ .\ R}\frac{0.481}{\sqrt{1+\left(2\omega L/R\right)^2}}=0.05$$

من أجل $(R=500\Omega)$ والتردد $(f=60Hz)$، فإننا نحصل على قيمة المحاثـــة من المعادلة السابقة:-

$$0.481^2 = 0.05^2\left[1+\left(4\times 60\times \pi L/_{500}\right)^2\right] \Rightarrow L = 6.34\ H$$

٢- تقويم موجة كاملة بأستخدام الجسر (Bridge Rectifier):-

دائرة هذا المقوم وشكل موجة الجهد على أطراف الحمل مبينة في الشكل (٢-٣٣).



الشكل (٢-٣٣)

دائرة تقويم موجة كاملة بأستخدام الجسر وشكل الموجة الخارجة

مثال (٢-٦):- مقوم جسري أحادي الطور يغذي محرك تيار مباشر وتيار الحمل يكون عبارة عن (I_a). حدد معامل التوافقيات لتيار المدخل (HF). ومعامل القدرة للمدخل (PF). يوجد ملف قبل المحرك حيث يعمل كمرشح عالي الجودة لتقليل معامل تموج تيار الحمل. يمكن إيجاد التيار الدخل من سلسلة فورير:-

$$i_1(t) = I_o + \sum_{n=1,3....}^{\infty}\left(a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t\right)$$

حيث أن:-

$$I_o = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_1(t)\, d(\omega t) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} I_a\ d(\omega t) = 0$$

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} i_1(t)\cos n\omega t\ d(\omega t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} I_a \cos n\omega t\, d(\omega t) = 0$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} i_1(t)\sin n\omega t\ d(\omega t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} I_a \sin n\omega t\, d(\omega t) = \frac{4I_a}{n\,\pi}$$

باستبدال قيم $(a_n\ ,b_n)$، نحصل على تيار المدخل من العلاقة:-

$$i_1(t) = \frac{4I_a}{\pi}\left[\frac{\sin \omega t}{1} + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + ...\right]$$

وتكون القيمة الفعالة الاساسية لتوافقية تيار المدخل:-

$$I_{S1} = \frac{4I_a}{\pi\sqrt{2}} = 0.90 I_a$$

أما القيمة الفعالة لتيار المدخل فتكون:-

$$I_s = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} I_a\left[1 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{5}\right)^2 + \left(\frac{1}{7}\right)^2 + \left(\frac{1}{9}\right)^2 + ...\right]^{1/2} = I_a$$

$$HF = \left[\left(\frac{1}{0.90}\right)^2 - 1\right]^{1/2} = 0.4843 \ \ or \ \ 48.43\%$$

زاوية الازاحة $(\phi = 0)$، ومعامل الإزاحة $(DF = \cos\phi = 1)$. ومعامل القدرة يساوي:-

$$PF = \frac{V_S I_1}{V_S I_S}\cos\phi = \frac{I_1}{I_S}\cos\phi = \frac{0.90 I_a}{I_a}\times 1 = 0.90$$

ملاحظة:- للمقوم الجسري فإن (TUF) تساوي:-

$$TUF = \frac{(0.6366)^2}{0.707 \times 0.707} = 0.81$$

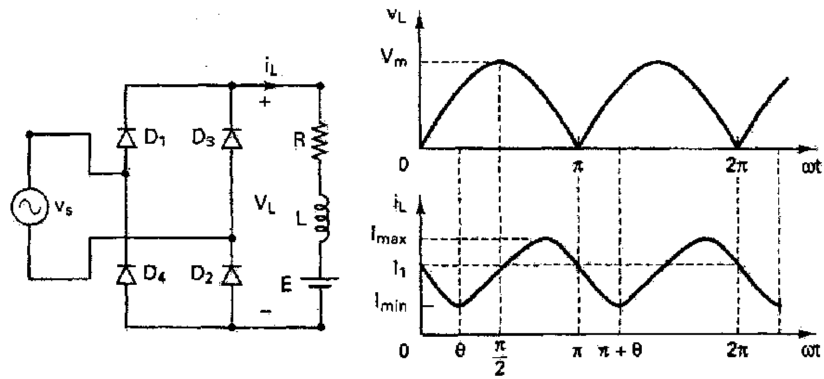
٢-٣-٥-١- التقويم أحادي الطور موجة كاملة بحمل حثي مادي:-

Single Phase-Full Wave Rectifiers with RL Load

معظم الأحمال الموجودة في الطبيعة هي حثيه. وان تيار الحمل يعتمد على قيمة كل من المقاومة والمحاثة، كما هو مبين في الشكل (٢-٣٤). وقمنا بإضافة فولتية البطارية (E) وذلك من أجل تسهيل حل المعادلات المستخدمة.

أذا كان $v_S = V_m \, Sin\, \omega t = \sqrt{2}\, V_S \;\; Sin\, \omega t$ هي فولتية المدخل، فإنه يمكن إيجاد تيار الحمل (i_L) من:-

$$L\frac{di_L}{dt} + R\, i_L + E = \sqrt{2}\; V_S \; Sin\, \omega t \qquad (2.164)$$



الشكل (٢-٣٤)

مقوم موجة كاملة بحمل حثي مادي

والتي يكون حلها من الشكل:-

$$i_L = \frac{\sqrt{2}\, V_S}{Z} Sin\,(\omega t - \theta) + A_1 e^{-(R/L)\,t} - \frac{E}{R} \qquad (2.165)$$

حيث أن الممانعة $\left(Z=\sqrt{R^2+(\omega L)^2}\right)$ وزاوية الحمل الحثي $\left(\theta=tan^{-1}\omega L/R\right)$.

الحالة الأولى:- تيار الحمل المستمر.

الثابت (A_1) في المعادلة (2.165)يمكن إيجادة من الشروط الابتدائية عند $(\omega t=\pi\,,\,i_L=I_1)$.

$$A_1=\left(I_1+\frac{E}{R}-\frac{\sqrt{2}\,V_S}{Z}Sin\,\theta\right)e^{(R/L)\,(\pi/\omega)} \qquad (2.166)$$

وبتعويض قيمة الثابت (A_1) في المعادلة (2.165)ينتج:-

$$i_L=\frac{\sqrt{2}\,V_S}{Z}Sin(\omega t-\theta)+\left(I_1+\frac{E}{R}-\frac{\sqrt{2}\,V_S}{Z}Sin\,\theta\right)e^{(R/L)(\pi/\omega-t)} \qquad (2.167)$$

في حالة الثبات فإن، $\left(i_L(\omega t=0)=i_L(\omega t=\pi)\right)$ وعندها تصبح $\left(i_L(\omega t=0)=I_1\right)$، وبتطبيق هذه الحالة نحصل على:-

$$I_1=\frac{\sqrt{2}\,V_S}{Z}Sin\,\theta+\frac{1+e^{-(R/L)(\pi/\omega)}}{1-e^{-(R/L)(\pi/\omega)}}-\frac{E}{R}\quad For\;\;I_1>0 \qquad (2.168)$$

بعد تبسيط واستبدال المعادلة (2.168)ينتج:-

$$i_L=\frac{\sqrt{2}\,V_S}{Z}Sin\,(\omega t-\theta)+\frac{2}{1-e^{-(R/L)(\pi/\omega)}}Sin\,\theta\;e^{-(R/L)\,t} \qquad (2.169)$$

$$For\;\;0\le\omega t\le\pi\;\;and\;\;i_L\ge 0$$

ومن المعادلة (2.169) يمكن إيجاد التيار الفعال للديود:-

$$I_r=\left[\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}i_L^2\;d(\omega t)\right]^{1/2} \qquad (2.170)$$

ويمكن إيجاد القيمة الفعالة لتيار الخرج وذلك بجمع التيارات على كل الديودات:-

$$I_{rms}=\left(I_r^2+I_r^2\right)^{1/2}=\sqrt{2}\ I_r \qquad (2.171)$$

ومن المعادلة (2.169)يمكن إيجاد القيمة المتوسطة لتيار للديود:-

$$I_d=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} i_L\ d(\omega t) \qquad (2.172)$$

الحالة الثانية:- تيار الحمل الغير مستمر. تيار الحمل يمر فقط خلال الفترة $(\alpha\le\omega t\le\beta)$. يبدأ الديود بالتوصيل خلال الفترة $(\omega t=\alpha)$وتعطى:-

$$\alpha=Sin^{-1}\frac{E}{V_m} \qquad (2.173)$$

عندما $(\omega t=\alpha)$ و $i_L(\omega t)=0$ وبعد معرفة قيمة الثابت (A_1)فإن المعادلة (2.165) تصبح كما يلي:-

$$A_1=\left(\frac{E}{R}-\frac{\sqrt{2}\ V_S}{Z}Sin(\alpha-\theta)\right)e^{(R/L)(\pi/\omega)} \qquad (2.174)$$

وبتعويض قيمة الثابت (A_1) في المعادلة (2.165) ينتج:-

$$i_L=\frac{\sqrt{2}\ V_S}{Z}Sin(\omega t-\theta)+\left(\frac{E}{R}-\frac{\sqrt{2}\ V_S}{Z}Sin(\alpha-\theta)\right)e^{(\frac{R}{L})(\frac{\pi}{\omega}-t)} \qquad (2.175)$$

عندما $(\omega t=\beta)$ يهبط التيار الى الصفر، وعندها تصبح $(i_L(\omega t=\beta)=0)$، وبتطبيق هذه الحالة نحصل على:-

$$\frac{\sqrt{2}\ V_S}{Z}Sin\ (\beta-\theta)+\left[\frac{E}{R}-\frac{\sqrt{2}\ V_S}{Z}Sin\ (\alpha-\theta)\right]e^{(R/L)(\alpha-\beta)\omega}=0$$

ومن المعادلة (2.175)يمكن إيجاد التيار الفعال للديود:-

$$I_r=\left[\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\beta} i_L^2\ d(\omega t)\right]^{1/2} \qquad (2.176)$$

ومن المعادلة (2.169) يمكن إيجاد القيمة المتوسطة لتيار للديود:-

$$I_d = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\beta} i_L \; d(\omega t) \qquad (2.177)$$

٢-٤- المرشحات Filters

نتيجة لعملية التقويم باستخدام الديودات فإن الجهد على الحمل يتألف من مركبتين، مركبة جهد مستمر ومركبة جهد متناوب، يحتوي على الموجة الأساسية وعدد من موجات التوافقيات لتلك الموجة والتي يمكن تحليلها باستخدام سلسلة فوريير.

$$V_L(t) = V_o + \sum_{n=1,2,..n}^{\infty}\left(a_n Cos\, n\omega t + b_n Sin\, n\omega t\right) \qquad (2.178)$$

من أجل تقويم نصف موجة يكون:-

$$V_L(t) = V_L\left(1 + \frac{\pi}{2}Cos\,\omega t + \frac{2}{3}Cos\,2\omega t - \frac{2}{15}Cos\,4\omega t + ...\right) \qquad (2.179)$$

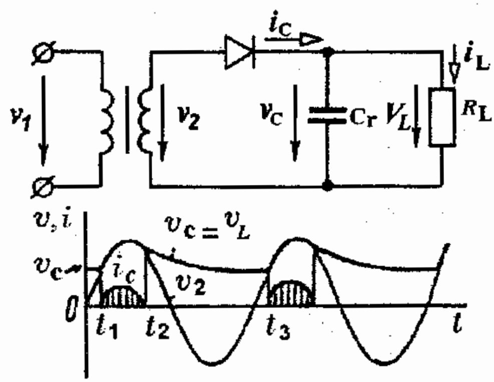
من أجل تقويم موجة كاملة يكون:-

$$V_L(t) = V_L\left(1 + \frac{2}{3}Cos\,\omega t - \frac{2}{15}Cos\,4\omega t + ..\right) \qquad (2.180)$$

ويكون تردد الموجة الأساسية لجهد الحمل في التقويم نصف الموجة يساوي تردد المنبع بينما تردد الموجة الأساسية لجهد الحمل في التقويم موجة كاملة يساوي ضعف تردد المنبع. والجهد الخارج في عملية التقويم لا يمكن استخدامة للوصل بشكل مباشر مع الحمل وإنما يجب أن تجرى عليه بعض عمليات التنعيم (الفلترة)، وهذه المرشحات تتألف من ملفات ومكثفات بالإضافة إلى المقاومات وتقسم إلى الأقسام الرئيسية التالية:-

١- المرشحات التي تستخدم المكثفات:- ومبدأ عملها يقوم علـــى أســـاس شـــحن المكثف خلال فترة توصيل الديود ومن ثم تفريغ هذه الشحنة في الحمل خلال الفترة التي يكون فيها الديود في حالة الفصل.

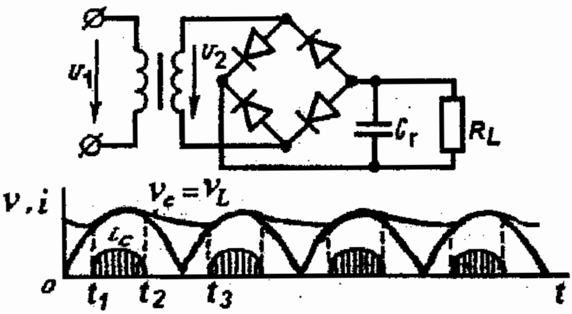
- تقويم نصف موجة كما في الشكل (٢-٣٥):-



الشكل(٢-٣٥)

مقوم نصف موجة ومرشح يستخدم المكثف وشكل الإشارة الخارجة

- تقويم موجة كاملة كما في الشكل (٢-٣٦):-



الشكل(٢-٣٦)

مقوم موجة كاملة وفلتر يستخدم المكثف وشكل الإشارة الخارجة

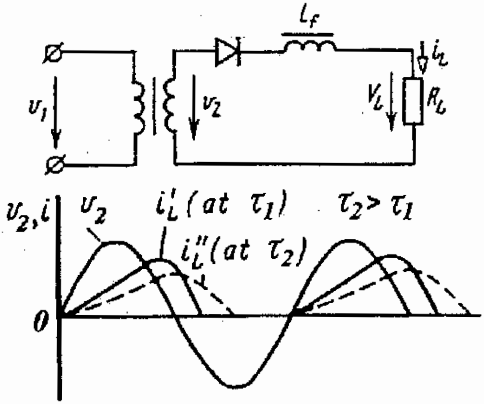
ويعرف معامل التنعيم بأنه النسبة بين معامل التموج للمدخل إلـــى معامــل التموج للخرج .

$$q = \frac{RF_{input}}{RF_{output}}$$

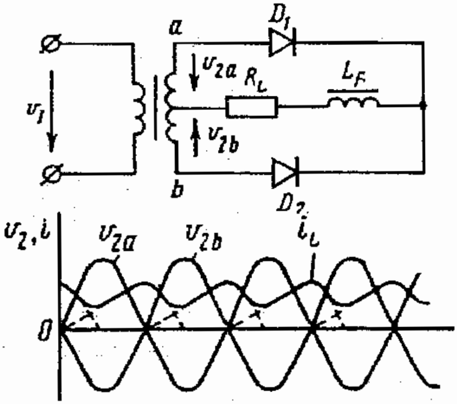
ويتم اختيار سعة المكثف عند التوافقية الأساسية من اجل الحصول علـــى عامل تنعيم افضل بحيث يكون زمن الشحن لها سريع وزمن التفريغ بطئ وتحــدد قيمة سعة المكثف من العلاقة:-

$$X_c = \frac{1}{2\pi \ f_1.C} << R_L \Rightarrow C >> \frac{1}{2\pi \ f_1.R_L} \qquad (2.181)$$

٢- المرشحات التي تستخدم الملفات:- ويتم بوصل الملف على التوالي مع الــديود كما في الشكل (٢-٣٧). ومبدأ عملها يقوم على تخزين الطاقة أثنـــاء توصــيل الديود، وثم تفريغ هذه الطاقة إلى الحمل أثناء فصل الديود. ونتيجة وجود فصل في عمل هذه الملفات في التقويم نصف موجة فإن هذا النوع من المرشحات لا يستخدم في التقويم نصف الموجة، ويستخدم في الدوائر ذات التيارات المرتفعة والأحمال الصغيرة.



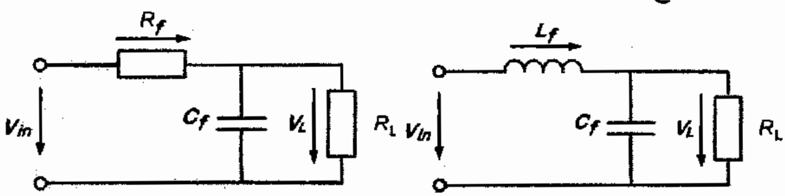
الشكل (٢-٣٧-a) مقوم نصف موجة مرشح يستخدم الملف وشكل الإشارات الخارجة.



الشكل (٢-٣٧-b)

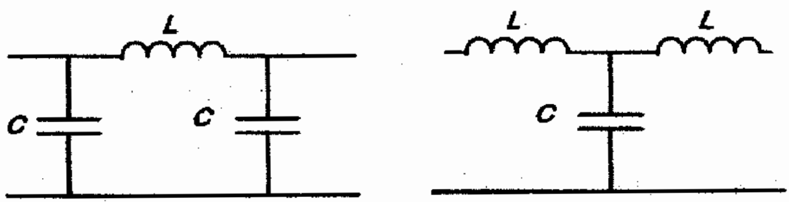
مقوم نصف موجة وموجة كاملة ومرشحات تستخدم الملف وشكل الإشارات الخارجة

٣- المرشحات التي تستخدم الملف والمكثف (RC, LC *Filters*) :- الشكل (٢-٣٨) يبين بعض انواع هذة المرشحات:-



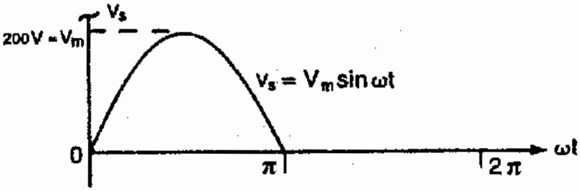
الشكل (٢-٨٣)

ويستخدم بشكل واسع النوع (π) والنوع (T) من المرشحات كما هو مبين في الشكل (٢-٩٣).



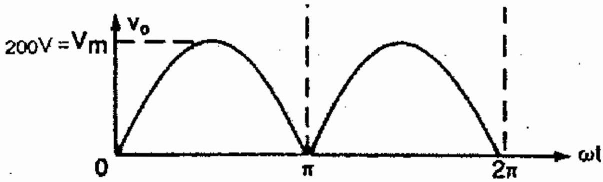
الشكل (٢-٩٣)

مثال (٢-٧): أوجد القيمة المتوسطة للموجة المبينة في الشكل:-



الحل:-

١- $$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} = 0.3183 \times 200 = 63.66V$$



٢- $$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = 2 \times 0.3183 \times 200 = 127.32V$$

مثال (٢-٨):- إذا كانت القيمة العظمى للجهد المقوم باستخدام تقويم موجة كاملة (Center Tapped) يساوي $(100V)$ وتردد المصدر يساوي $(60Hz)$ أحسب:-

١- القيمة المتوسطة للجهد على الحمل.

٢- PIV للديود.

٣- تردد موجة الخرج.

الحل:-

١- $$V_o = \frac{2V_m}{\pi} = 0.637 \times 100 = 63.7V$$

٢- $$PIV = 2V_m = 2 \times 100 = 200V$$

٣- $$f_{out} = 2f_{in} = 2 \times 60 = 120Hz$$

٢-٥- دوائر التقويم ثلاثية الاطوار بأستخدام الديودات

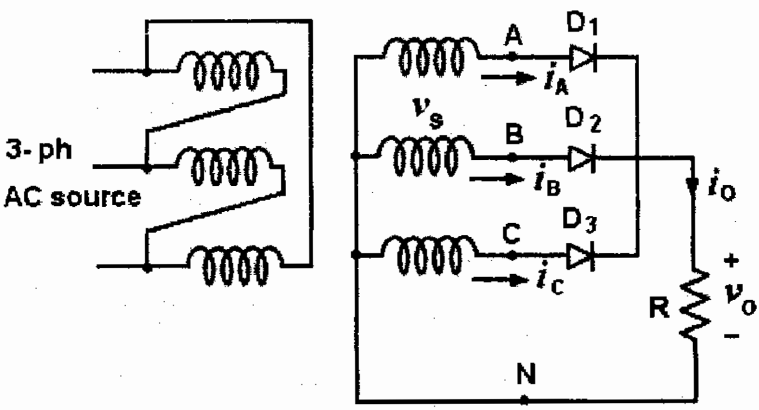
Three Phase Rectifier with Diodes

تقسم هذة الدوائر الى الاقسام الرئيسية التالية:-

٢-٥-١- التقويم ثلاثي الطور نصف موجه بحمل مادي

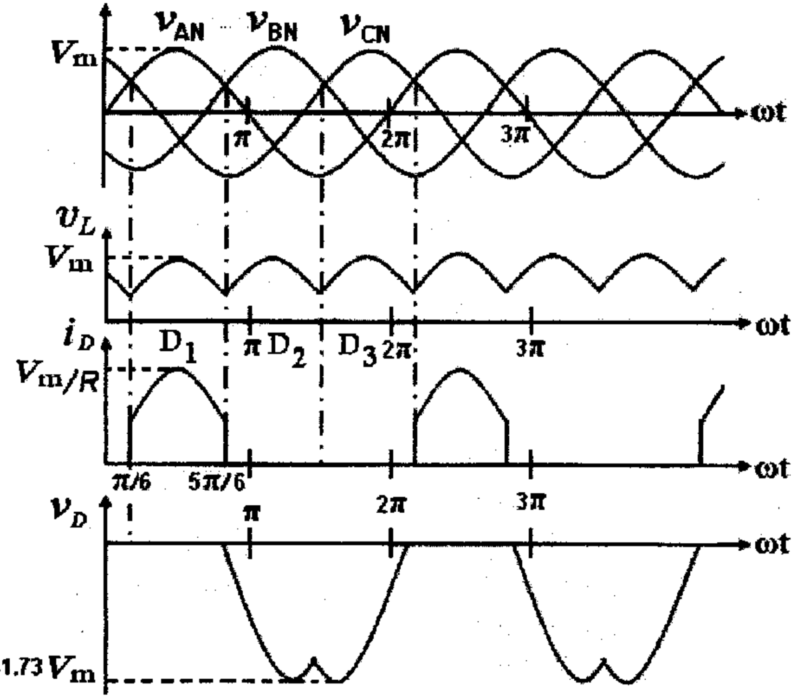
Three Phase Half-Wave Rectifier with Resistive Load

تتألف دائرة التقويم من ثلاثة ديودات بحيث يوصل ديود واحد مع كل طور من الأطوار الثلاثة، ويتم تحليل عمل الدائرة بتحديد فترة التوصيل لكل ديود من الديودات، حيث يقوم كل ديود بالتوصيل لفترة (120°) بالتتابع (D_1, D_2, D_3). الدائرة المبينة في الشكل (٢-٤٠) تبين دائرة مقوم ثلاثي الأطوار نصف موجة بحمل مادي، والشكل (٢-٤١) يبين شكل موجة المدخل وشكل موجة المخرج على أطراف الحمل خلال فترات التوصيل لكل ديود.



الشكل (٢-٤٠)

دائرة مقوم ثلاثي الأطوار نصف موجة بحمل مادي



الشكل (٢-٤١)

شكل موجة المدخل والمخرج لدائرة مقوم ثلاثي الأطوار نصف موجة بحمل مادي

عندما يكون جهد الطور الأول في النصف الموجب للموجة أكبر من جهد الطور الثاني والثالث فإن ألديود (D_1) يكون موصلاً، ويظهر جهد الطور (A) على أطراف الحمل، وخلال الجزء السالب لهذا الطور فان ألديود (D_1) يكون منحاز انحيازاً عكسيا، ونفس التحليل يكرر لكلا الديودين.

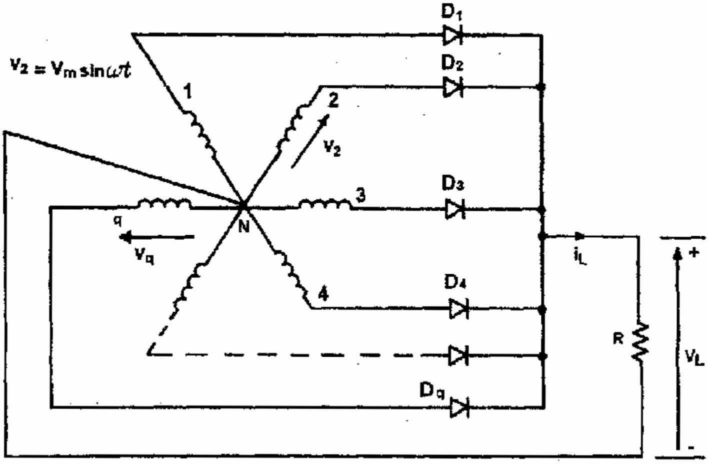
القيمة المتوسطة للجهد على أطراف الحمل تعطى بالعلاقة :-

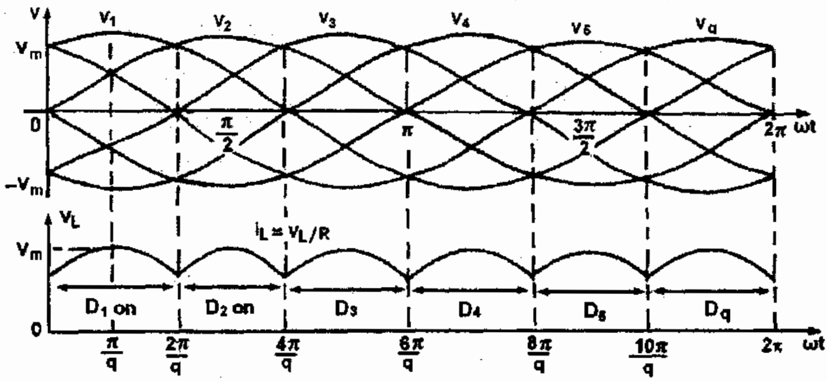
$$V_{dc} = \frac{2\times 3}{2\pi}\int_0^{\frac{\pi}{3}} V_m \, Cos\,\omega t \, d\,\omega t = \frac{3\sqrt{3}\,V_m}{2\pi} = 0.827\,V_m \quad (2.182)$$

القيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل تعطى بالعلاقة :-

$$V_{rms}=\sqrt{\frac{2\times 3}{2\pi}\int_{0}^{\frac{\pi}{3}}V_m^2\ Cos^2\omega t\, d\,\omega t}=V_m\ \sqrt{\frac{3}{2\pi}\left(\frac{\pi}{3}+\frac{1}{2}sin\frac{2\pi}{3}\right)}=0.84068\,V_m$$

نظام تقويم متعدد الأطوار نصف موجة:-





الشكل (٢-٤٢) مخطط الدائرة وشكل موجة جهد المخرج

إن العلاقات السابقة هي علاقات الحالة الخاصة من دوائر التقويم متعددة الأطـــوار نصف موجة، حيث أن عدد الأطوار في هذه الحالة يساوي ثلاثة أي أن $(M=3)$، وعدد الأطوار في هذه الدوائر يساوي عدد الديودات. والشكل (٢-٤٢) يبين مخطط الدائرة وشكل موجة جهد المخرج على أطراف الحمل لــدوائر التقــويم متعــددة الأطوار (q تمثل عدد الديودات). أن العلاقات العامة للقيمة المتوســطة والقيمـــة الفعالة للجهد على أطراف الحمل من اجل دوائر تقويم متعددة الاطوار نصف موجة إذا كان عدد الأطوار يساوي (M) تعطى بالعلاقات التالية :-

$$V_{dc}=\frac{2\times M}{2\pi}\int_{0}^{\frac{\pi}{M}}V_m\ Cos\,\omega t\ d\,\omega t=\frac{M\times V_m}{\pi}\ sin\frac{\pi}{M} \qquad (2.183)$$

$$V_{rms}=\sqrt{\frac{2\times M}{2\pi}\int_{0}^{\frac{\pi}{M}}V_m^2\ Cos^2\omega t\ d\,\omega t}$$
$$=V_m\sqrt{\frac{M}{2\pi}\left(\frac{\pi}{M}+\frac{1}{2}Sin\frac{2\pi}{M}\right)} \qquad (2.184)$$

في حال كون الحمل لهذه الدائرة حملاً مادياً:-

القيمة العظمى للتيار خلال الديود تعطى بالعلاقة:-

$$I_m=\frac{V_m}{R} \qquad (2.185)$$

والقيمة الفعالة لتيار ملف الثانوي للمحول (I_S) والذي يساوي القيمة الفعالة للتيار خلال الديود يعطى بالعلاقة:-

$$I_S=\sqrt{\frac{2}{2\pi}\int_{0}^{\frac{\pi}{M}}I_m^2\ Cos^2\omega t\ d\,\omega t}$$
$$=\ I_m\sqrt{\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\pi}{M}+\frac{1}{2}Sin\frac{2\pi}{M}\right)}=\frac{V_{rms}}{R} \qquad (2.186)$$

والقيمة المتوسطة لتيار الديود للدوائر ثلاثية الاطوار يعطى بالعلاقة:-

$$I_d = \frac{2}{2\pi}\int_0^{\frac{\pi}{M}} I_m \, Cos\,\omega t \, d\,\omega t = \frac{I_m}{\pi}\sin\frac{\pi}{M} \qquad (2.187)$$

والقيمة المتوسطة لتيار الديود للدوائر ثلاثية الأطوار تعطى بالعلاقة:-

$$I_d = \frac{I_m}{\pi}\sin\frac{\pi}{3} = 0.2757\ I_m \qquad (2.188)$$

وتعطى القيمة الفعالة لتيار الملف الثانوي للمحول في الدوائر ثلاثية الأطوار بالعلاقة:-

$$I_S = I_m\sqrt{\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\pi}{3}+\frac{1}{2}Sin\frac{2\pi}{3}\right)} \qquad (2.189)$$

$$V_S = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$P_{VA} = 3\,V_S \cdot I_S$$

القيمة العظمى لجهد الانحياز العكسي على أطراف الديود (PIV) يساوي القيمة العظمى لجهد الخط ويساوي:-

$$PIV = \sqrt{3}\ V_m$$

أما بالنسبة لتردد موجة المخرج يساوي $(f_{out} = 3\ f_{in})$ من تردد الموجة الاساسية.

فترة التوصيل لكل ديود تساوي :-

$$\frac{2\pi}{3} = 120^{\circ}$$

$$V_{dc} = 0.827\ V_m$$

$$V_{rms} = 0.84058\ V_m$$

في حال كون الحمل حملاً مادياً فإن:-

$$I_S = I_m\sqrt{\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\pi}{M}+\frac{1}{2}\,Sin\frac{2\pi}{M}\right)}$$

$$I_S = \frac{0.4854\,V_m}{R} = 0.4854\,I_m \qquad (2.190)$$

$$I_d = \frac{I_m}{\pi}\,Sin\frac{\pi}{M} \Rightarrow I_d = 0.2757\,I_m \qquad (2.191)$$

والجدول (٢-١) يبين فترات التوصيل لكل ديود من الديودات وجهد الانحياز العكسي على أطراف هذه الديودات من دوائر التقويم ثلاثية الأطوار نصف موجة:-

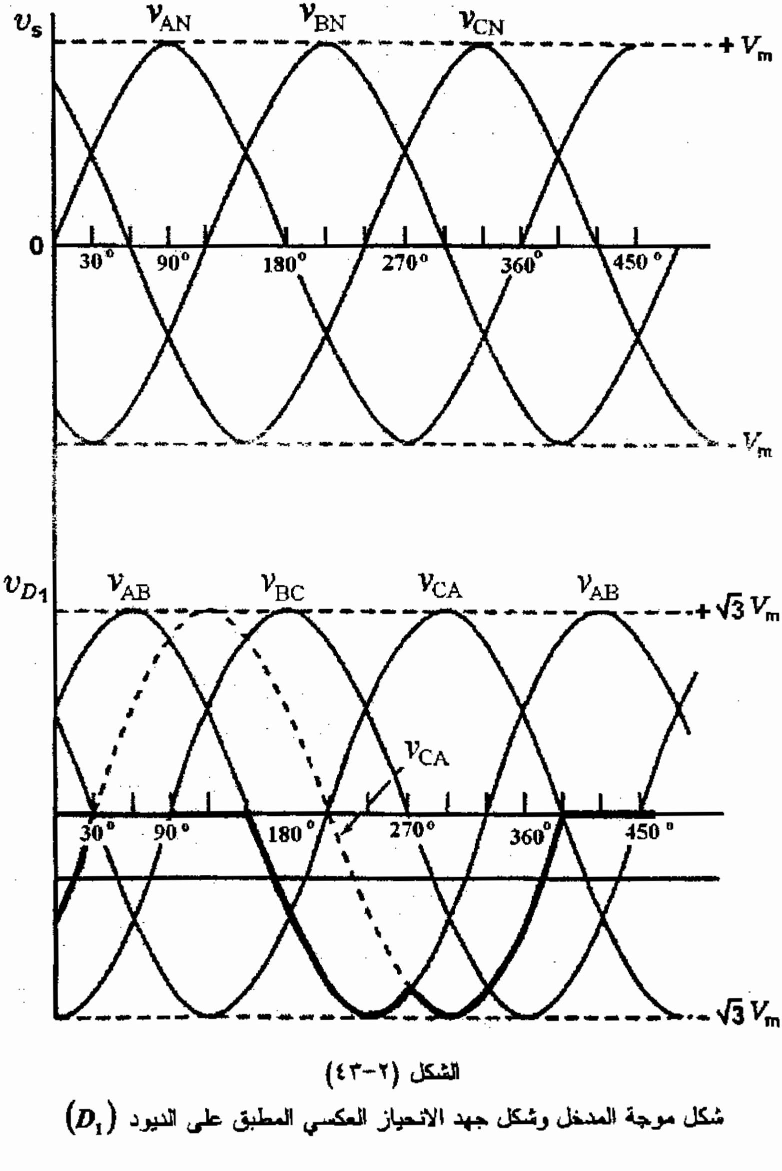
Period	On diode	Off diode	Diode Voltage		
			V_{D1}	V_{D2}	V_{D3}
$0-30^o$	D_3	D_1 and D_2	V_{AC}	V_{BC}	0
$30-150^o$	D_1	D_2 and D_3	0	V_{BA}	V_{CA}
$150-270^o$	D_2	D_3 and D_1	V_{AB}	0	V_{CB}
$270-390^o$	D_3	D_1 and D_2	V_{AC}	V_{BC}	0

الجدول (٢-١)

ويبين الشكل (٢-٤٣) شكل موجة المدخل وشكل جهد الانحياز العكسي المطبق على الديود (D_1).

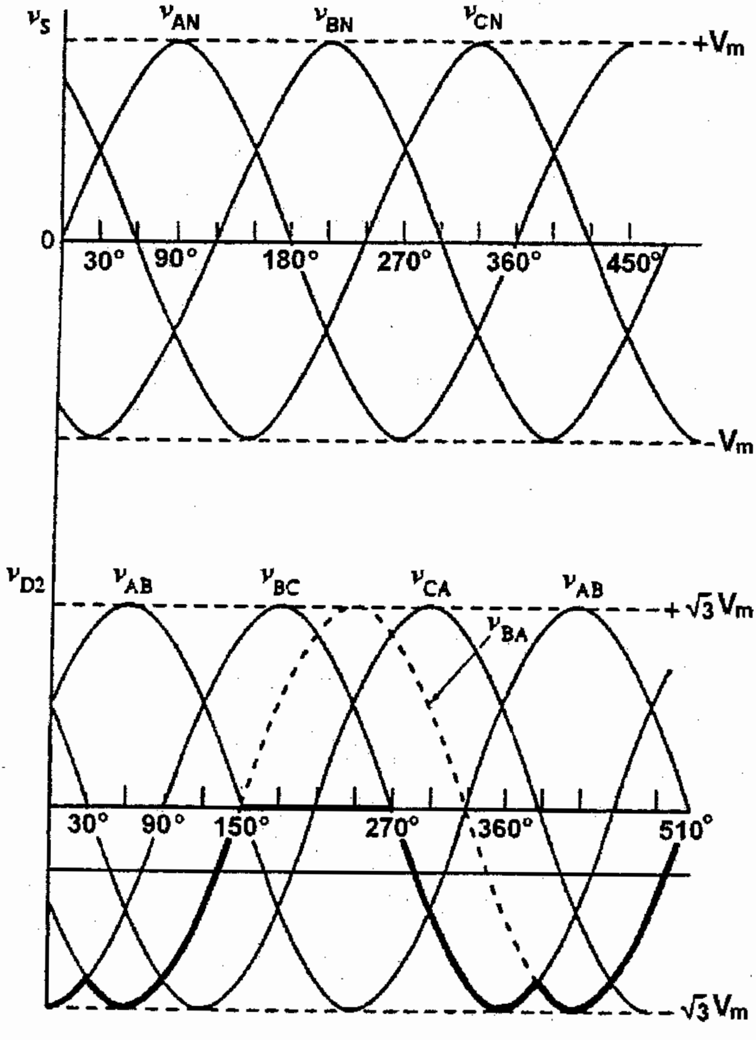
والشكل (٢-٤٤) يبين شكل موجة المدخل وشكل جهد الانحياز العكسي المطبق على الديود (D_2).

والشكل (٢-٤٥) يبين شكل جهد الانحياز العكسي المطبق على الديود (D_3).



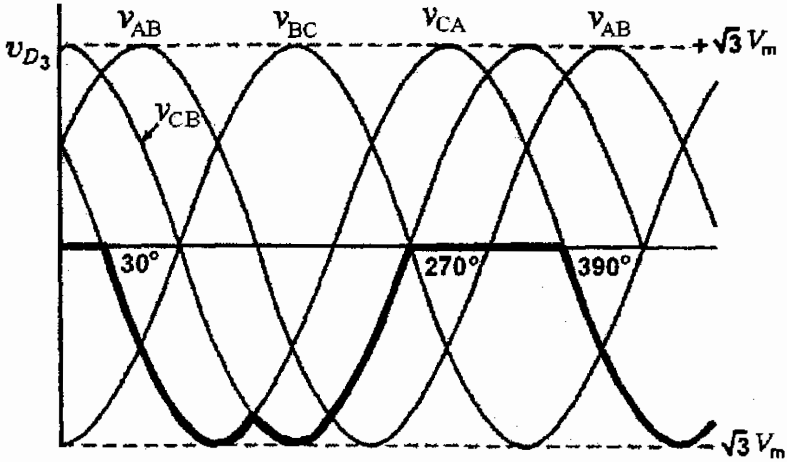
الشكل (٢-٤٣)

شكل موجة المدخل وشكل جهد الانحياز العكسي المطبق على الديود (D_1)



الشكل (٢-٤٤)

شكل موجة المدخل وشكل جهد الانحياز العكسي المطبق على الديود (D_2)



الشكل (٢-٤٥)

يبين شكل جهد الانحياز العكسي المطبق على الديود (D_3)

مثال (٢-٩):- مقوم ثلاثي الطور نصف موجة بحمل مادي. أوجد الكفاءة، معامل الشكل، معامل التموج، معامل الاستعمال للمحول، القيمة العظمى لجهد الانحياز العكسي على الديودات، والقيمة العظمى لتيارالديود. إذا كان المقوم يعطي تيار $(I_o = 30\ A)$ والفولتية الخارجة $(V_o = 140\ V)$.

الحل:-

من المقوم ثلاثي الطور فإن $(M = 3)$، فمن المعادلات السابقة نجد أن:-

$$V_o = 0.827\ V_m$$

$$I_o = \frac{0.827\ V_m}{R}$$

$$V_R = 0.84068\ V_m$$

$$I_R = \frac{0.84068\ V_m}{R}$$

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{(0.827\ V_m)^2 / R}{(0.84068\ V_m)^2 / R} = 96.77\%$$

$$FF = \frac{V_R}{V_o} = \frac{0.84068}{0.827} = 1.0165 = 101.65\%$$

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1.0165^2 - 1} = 0.1824 = 18.24\%$$

$$V_S = 0.707\,V_m$$

$$I_S = 0.4854\,I_m = \frac{0.4854 V_m}{R}$$

$$P_{VA} = 3V_S\,I_S = 3 \times 0.707 V_m \frac{0.4854 V_m}{R}$$

$$TUF = \frac{0.827^2}{3 \times 0.707 \times 0.4854} = 0.6643$$

$$PIV = \sqrt{3}\,V_m$$

حيث أن $(M = 3)$، فإن القيمة المتوسطة لتيار الديود:-

$$I_d = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi/M} I_m \cos \omega t \; d(\omega t) = I_m \frac{1}{\pi} \sin \frac{\pi}{M} = 0.275\,I_m$$

$$I_d = \frac{30}{3} = 10\ A \Rightarrow I_m = \frac{10}{0.2757} = 36.27\ A$$

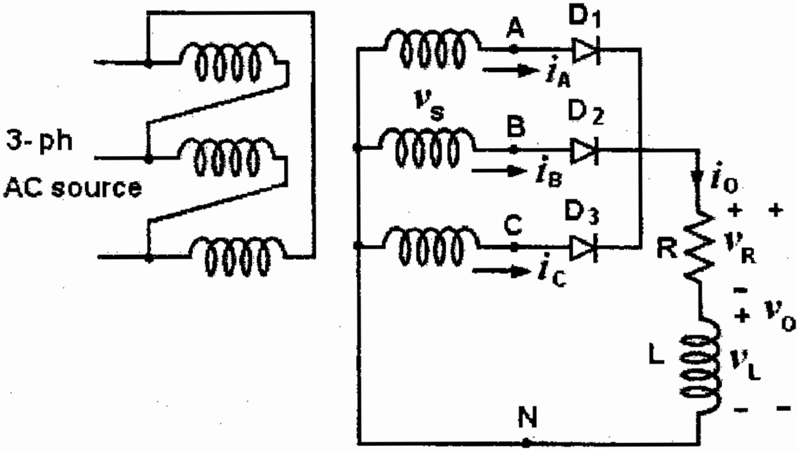
٢-٥-٢- دوائر التقويم ثلاثية الأطوار نصف موجة بحمل حثي ($R - L$ *Load*)

Three Phase Half-Wave Rectifier with RL Load

في الحياة العملية معظم الاحمال الكهربائية هي أحمال حثية موصولة على التوالي مع المقاومات المادية كما هو مبين في الدائرة الكهربائية المبينة في الشكل (٢-٤٦).

في هذه الحالة يصبح التيار المار من خلال الحمل أكثر ثباتاً ومعامل التموج له يصبح مهملاً، وكلما زادت قيمة المفاعلة الحثية للملف يزداد التيار ثباتاً، وعندما تصبح قيمة المفاعلة الحثية للملف لانهائية، فإن التموج في هذه الحالة يصبح مساوياً للصفر. وكذلك لا يوجد تغيير في شكل الموجة لجهد المخرج، والقيمة المتوسطة لجهد الحمل تعطى بالعلاقة:-

$$V_{dc} = \frac{3V_m}{\pi} Sin\frac{\pi}{3}$$



الشكل (٢-٤٦)

دائرة تقويم ثلاثية الأطوار نصف موجة بحمل حثي

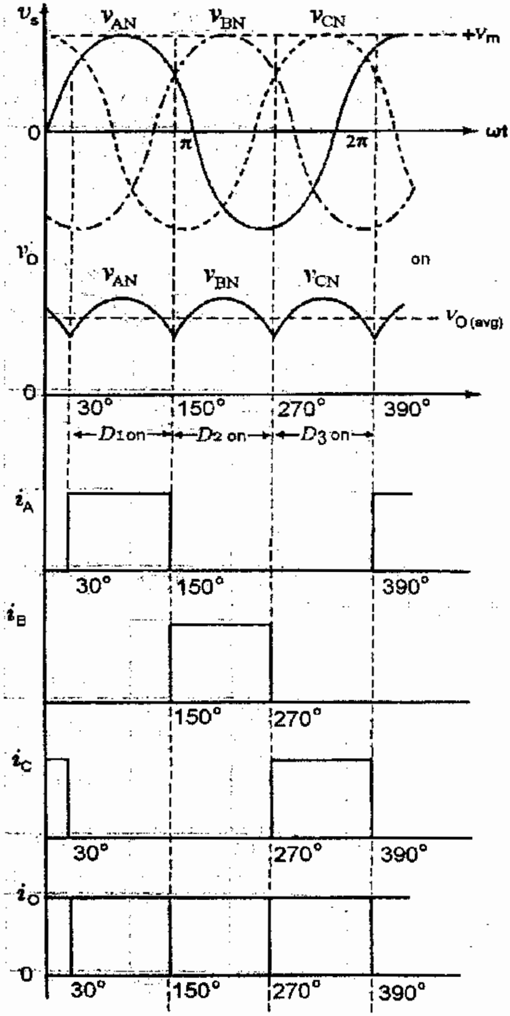
وتعطى القيمة المتوسطة للتيار خلال الديود بالعلاقة :-

$$I_{D(ave)} = \frac{I_{dc}}{3}$$

وبما أن تيار الحمل يكون ثابتاً في هذه الحالة كما هو مبين في الشكل (٢-٤٧)، فإنه يمكن اعتبار أن :-

$$I_{dc} = I_{rms}$$

$$I_{D(m)} = I_m = I_{D(ave)}$$

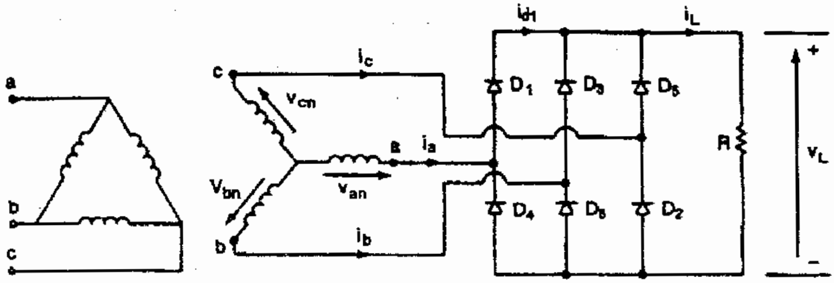


الشكل(٢-٤٧) شكل الموجة الخارجة في حالة الاحمال الحثية والتيار ثابتاً

٢-٥-٣- دوائر التقويم ثلاثية الأطوار موجة كاملة

Three Phase Fall-Wave Rectifier

تبين الدائرة المبينة في الشكل (٢-٤٨) دائرة تقويم موجة كاملة ثلاثية الأطوار يمكن أن تستخدم بوجود محول او بعدم وجود محول وتعطي ستة نبضات لموجة الخرج خلال الزمن الدوري للموجة. فترة التوصيل لكل ديود هي (120°) وتقسم الى فترتين.



الشكل (٢-٤٨)

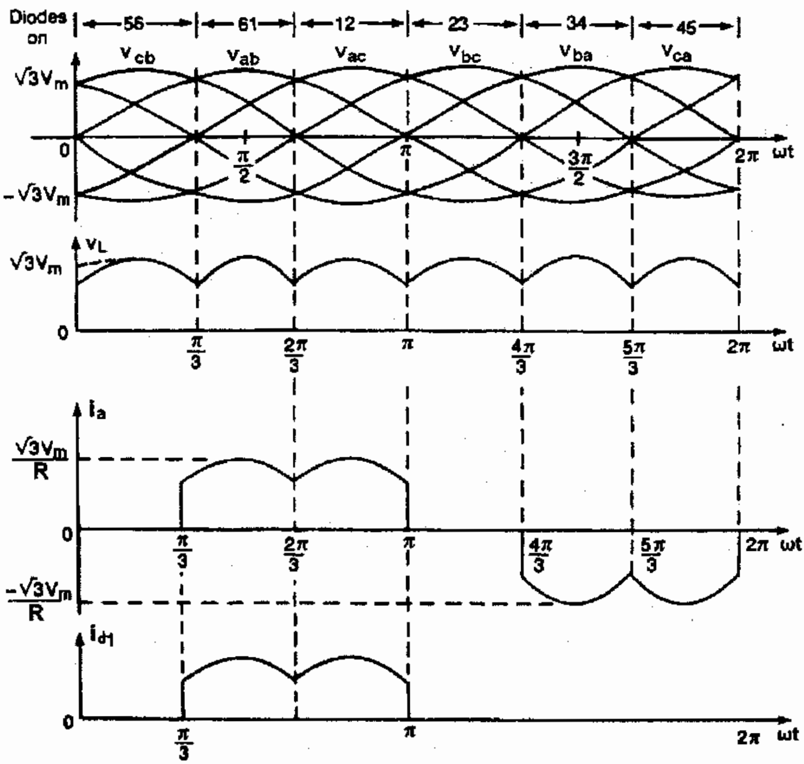
دائرة تقويم ثلاثية الأطوار موجة كاملة

الجدول (٢-٢) يبين تتابع الاطوار خلال فترات توصيل كل من الديودات.

period	Highest Positive Voltage	Highest Negative Voltage	On Diodes	
			Odd-numbered	Even-numbered
$0-60^\circ$	C	B	D_5	D_6
$60-120^\circ$	A	B	D_1	D_6
$120-180^\circ$	A	C	D_1	D_2
$180-240^\circ$	B	C	D_3	D_2
$240-300^\circ$	B	A	D_3	D_4
$300-360^\circ$	C	A	D_5	D_4

الجدول (٢-٢)

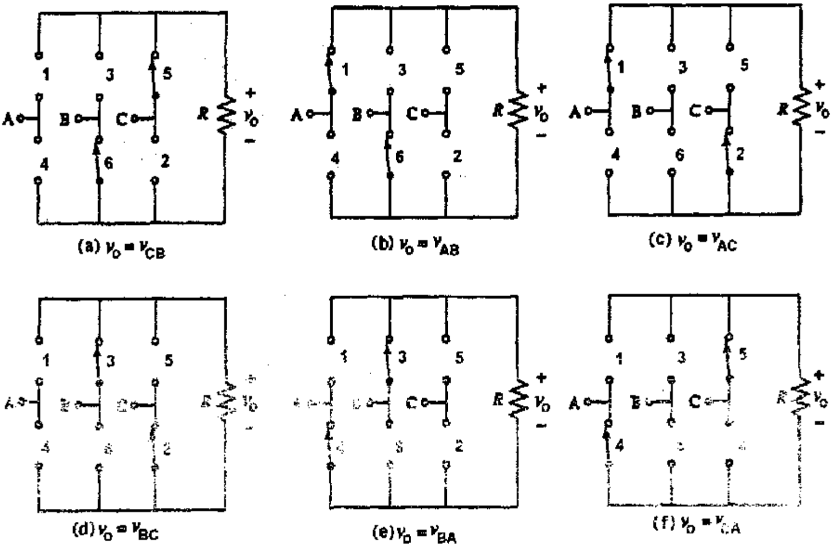
ويكـــــون تتـــــابع التوصـــــيل للـــــديودات حـــــسب الترتيـــــب التالي $\left(D_1D_2,D_2D_3,D_3D_4,D_4D_5,D_5D_6,D_6D_1\right)$، حيث يوصل الديودان اللـــذان يكون الجهد المطبق عليهما(جهد الخط) أكبر من الجهود الاخرى سواءً كان ذلـــك في النصف الموجب أو النصف السالب للموجة. والـــشكل (٢-٤٩) يبـــين شـــكل الموجة على الحمل وفترات التوصيل لكل ديود من الديودات.



الشكل (٢-٤٩)

شكل الموجة على الحمل وفترات التوصيل لكل ديود

والشكل (٢-٥٠) يبين دوائر تتابع توصيل الديودات للدائرة.



الشكل (٢-٥٠)

دوائر تتابع توصيل الديودات للدائرة

العلاقات الرياضية الخاصة بدائرة التقويم ثلاثية الأطوار موجة كاملة باستخدام الديودات :-

جهد الخط يساوي $(\sqrt{3})$ جهد الطور ويساوي :-

$$V_L = \sqrt{3}\, V_{ph}$$

القيمة المتوسطة للجهد على اطراف الحمل تعطى بالعلاقة :-

$$V_{dc} = \frac{2 \times 6}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{3}\, V_m \, Cos\, \omega t \, d\, \omega t = \frac{3\sqrt{3}\, V_m}{\pi} = 1.6542\, V_m$$

القيمة الفعالة للجهد على اطراف الحمل تعطى بالعلاقة:-

$$V_R = \sqrt{\frac{2\times 6}{2\pi}\int_0^{\frac{\pi}{6}} 3V_m^2\, Cos^2\omega t\, d\omega t} = V_m\sqrt{\frac{3}{2}+\frac{9\sqrt{3}}{4\pi}} = 1.6554\, V_m$$

أذا كان الحمل لهذا المقوم حملاً مادياً فإن القيمة العظمـــي للتيـــار خـــلال الـــديود تساوي:-

$$I_m = \frac{\sqrt{3}\,V_m}{R}$$

القيمة الفعالة للتيار خلال الديود تعطى بالعلاقة :-

$$I_d = \sqrt{\frac{4}{2\pi}\int_0^{\frac{\pi}{6}} I_m^2\, Cos^2\omega t\, d\omega t} = I_m\sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\frac{\pi}{6}+\frac{1}{2}Sin\frac{2\pi}{6}\right)} = 0.5518\, I_m$$

والقيمة الفعالة لتيار ملف الثانوي للمحول تعطى بالعلاقة :-

$$I_S = \sqrt{\frac{8}{2\pi}\int_0^{\frac{\pi}{6}} I_m^2\, Cos^2\,\omega t\, d\,\omega t} = I_m\sqrt{\frac{2}{\pi}\left(\frac{\pi}{6}+\frac{1}{2}Sin\frac{2\pi}{6}\right)} = 0.7804\, I_m$$

$$I_{dc} = \frac{1.6542\, V_m}{R}$$

$$I_R = \frac{1.6554\, V_m}{R}$$

$$P_{dc} = \frac{(1.6542\, V_m)^2}{R}$$

$$\eta = \frac{(1.6542\, V_m)^2}{(1.6554\, V_m)^2} = 99.98\,\%$$

$$F.F = \frac{V_R}{V_o} = \frac{1.6554}{1.652} = 1.0008 = 100.08\,\%$$

$$RF = \sqrt{(F.F)^2 - 1} = 0.0374 = 3.74\,\%$$

$$V_S = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707\,V_m$$

$$I_S = 0.7804\,I_m$$

$$I_m = \frac{\sqrt{3}\,V_m}{R} \Rightarrow I_S = 0.7804 \times \sqrt{3}\,\frac{V_m}{R}$$

$$P_{VA} = 3\,V_S\;I_S = 3 \times 0.707\,V_m \times 0.7804 \times \sqrt{3}\,\frac{V_m}{R}$$

$$TUF = \frac{P_{dc}}{P_{VA}} = \frac{(1.6542)^2}{3 \times \sqrt{3} \times 0.707 \times 0.7804} = 0.9545$$

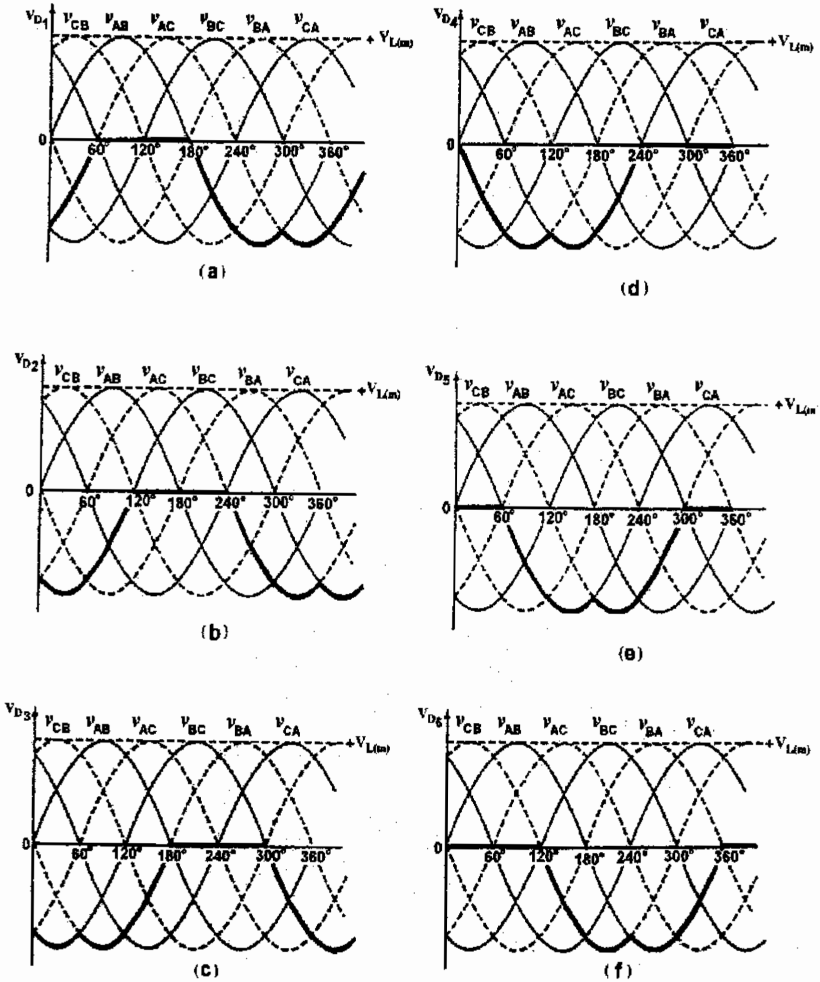
$$PIV = \sqrt{3}\,V_m$$

يبين الجدول (٢-٣) جهد الانحياز العكسي على الديودات خـلال فتـرات الفصل لكلٍ منها.

Period	On Diodes	Diode Voltage					
		VD_1	VD_2	VD_3	VD_4	VD_5	VD_6
$0-60^o$	D_5 and D_6	V_{AC}	V_{BC}	V_{BC}	V_{BA}	0	0
$60-120^o$	D_6 and D_1	0	V_{BC}	V_{BA}	V_{BA}	V_{CA}	0
$120-180^o$	D_1 and D_2	0	0	V_{BA}	V_{CA}	V_{CA}	V_{CB}
$180-240^o$	D_2 and D_3	V_{AB}	0	0	V_{CA}	V_{CB}	V_{CB}
$240-300^o$	D_3 and D_4	V_{AB}	V_{AC}	0	0	V_{CB}	V_{AB}
$300-360^o$	D_4 and D_5	V_{AC}	V_{AC}	V_{BC}	0	0	V_{AB}

جدول (٢-٣)

الشكل (٢-٥١) يبين جهد الانحياز العكسي المطبق على الديودات المكونة لدائرة تقويم ثلاثي الطور موجة كاملة.



الشكل (٢-٥١)

شكل جهد الانحياز العكسي المطبق على الديودات

مثال (٢-١٠):- مقوم ثلاثي الطور موجة كاملة بحمل مـــادي، أوجـــد الكفـــاءة، معامل الشكل، معامل التموج، معامل الاستعمال للمحول، القيمة العظمـــى لجهـــد الانحياز العكسي على الديودات، قيمة التيار العظمى على الديود، إذا كان المقـــوم يعطي تيـــار $(I_o = 60\ A)$ والفولتيـــة الخارجـــة $(V_o = 280.7\ V)$، والتـــردد $(f = 60 Hz)$.

الحل:-

من المعادلات السابقة لمقوم ثلاثي الطور موجة كاملة نجد أن:-

$$V_o = 1.6542\ V_m$$

$$I_o = \frac{1.6542\ V_m}{R}$$

$$V_R = 1.6554\ V_m$$

$$I_R = \frac{1.6554\ V_m}{R}$$

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{(1.6542\ V_m)^2 / R}{(1.6554\ V_m)^2 / R} = 99.83\%$$

$$FF = \frac{V_R}{V_o} = \frac{1.6554}{1.6542} = 1.0008 = 100.08\%$$

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1.0007^2 - 1} = .0.0374 = 3.74\%$$

$$V_S = 0.707 V_m$$

$$I_S = 0.7804 I_m = 0.7804 \times \sqrt{3}\frac{V_m}{R}$$

$$P_{VA} = 3V_S\, I_S = 3 \times 0.707V_m \times 0.7804 \times \sqrt{3}\frac{V_m}{R}$$

$$TUF = \frac{1.6542^2}{\sqrt{3} \times 0.707 \times 0.7804} = 0.9545$$

$$V_m = \frac{280.7}{1.6542} = 169.7\,V$$

$$PIV = \sqrt{3}V_m = \sqrt{3} \times 169.7 = 293.9\ V$$

والتيار المار خلال الديود:-

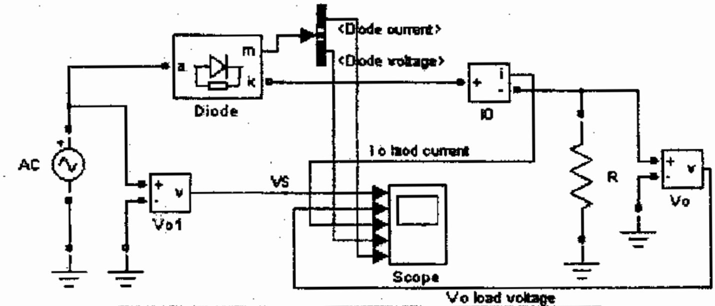
$$I_d = \frac{4}{2\pi}\int_0^{\pi/6} I_m \cos\,\omega t\ d(\omega t) = I_m \frac{2}{\pi} \sin\frac{\pi}{6} = 0.3184\,I_m$$

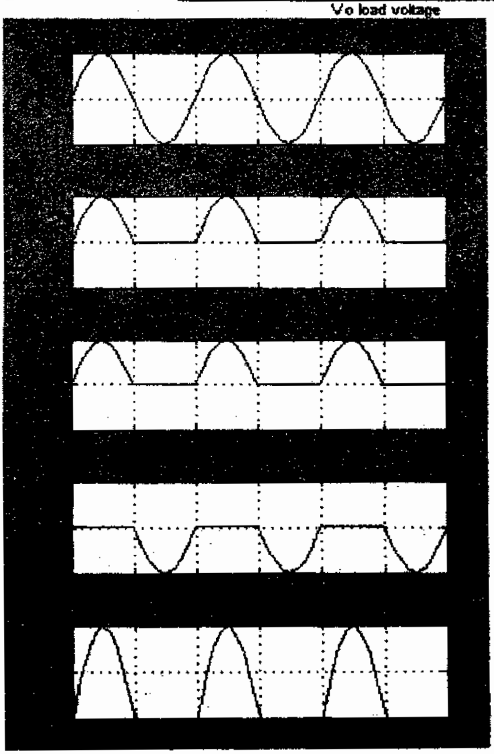
والقيمة المتوسطة لتيار الديود:-

$$I_d = \frac{60}{3} = 20\ A \Rightarrow I_m = \frac{20}{0.3184} = 62.81\,A$$

٢-٦- الدوائر العملية والحل الرياضي على برنامج (Math-Lab)

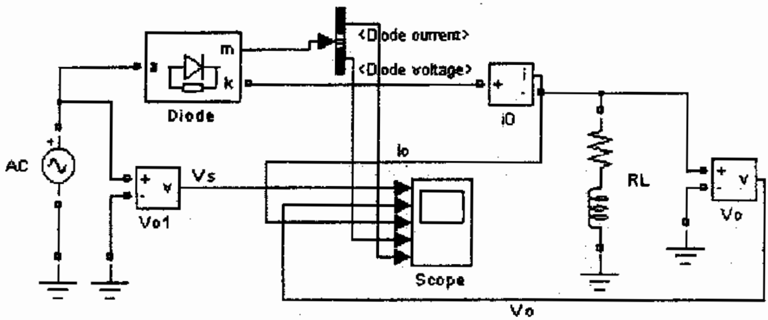
٢-٦-١- دائرة تقويم أحادي الطور نصف موجه(حمل مادي)

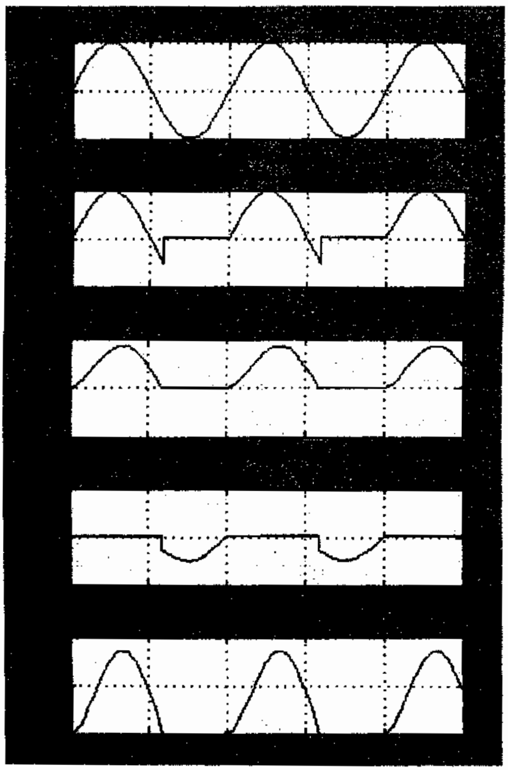




شكل (٢-٥٢) الحل الرياضي لدائرة تقويم نصف موجة بحمل مادي

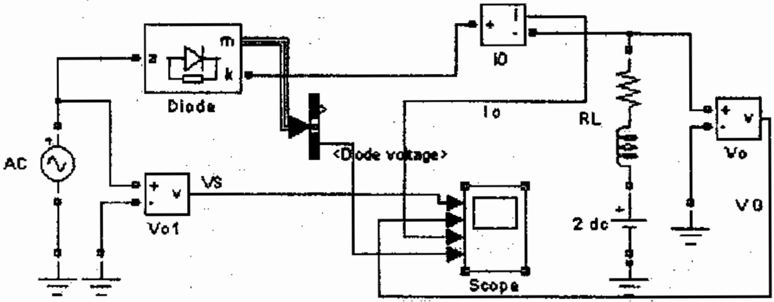
٢-٦-٢- دائرة تقويم أحادي الطور نصف موجة (حمل مادي حثي)

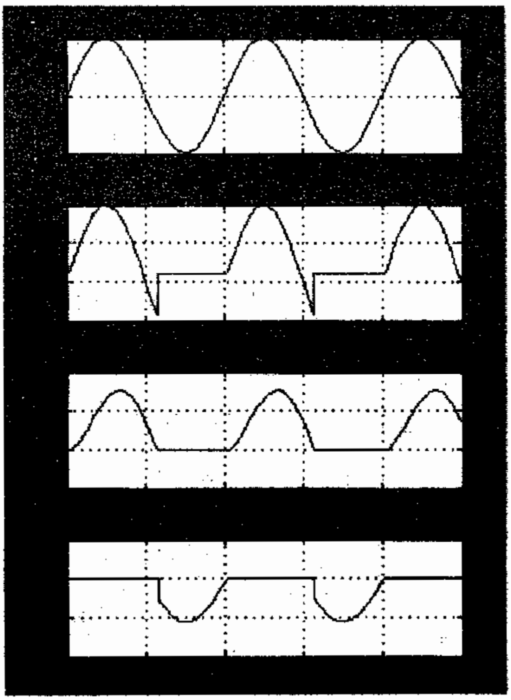




شكل (٢-٥٣) الحل الرياضي لدائرة تقويم نصف موجة بحمل مادي حثي

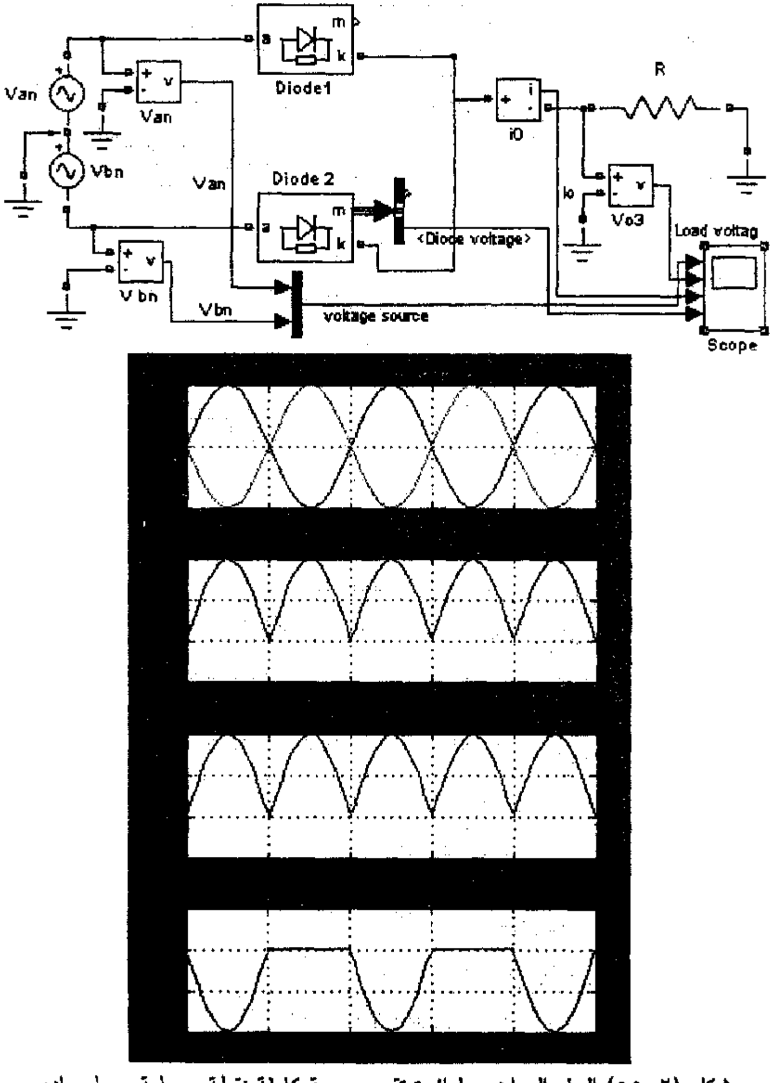
٢-٦-٣- دائرة تقويم أحادي الطور نصف موجة (حمل مادي حثي وقوة دافعة كهربائية)





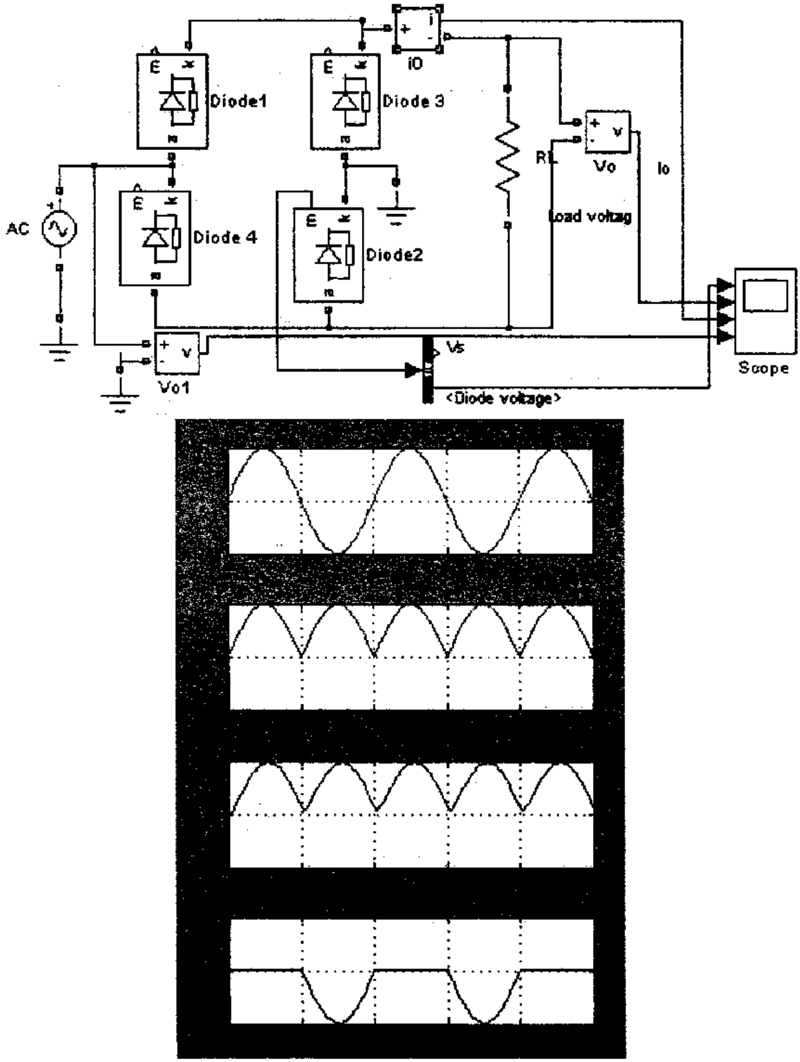
شكل (٢-٥٤) الحل الرياضي لدائرة تقويم نصف موجة بحمل مادي حثي وقوة دافعة كهربائية

٢-٦-٤- دائرة تقويم أحادي الطور موجة كاملة نقطة وسطية (حمل مادي)



شكل (٢-٥٥) الحل الرياضي لدائرة تقويم موجة كاملة نقطة وسطية بحمل مادي

٢-٦-٥- دائرة تقويم أحادي الطور موجة كاملة قنطرة (حمل مادي)



شكل (٢-٥٦) الحل الرياضي لدائرة تقويم موجة كاملة قنطرة بحمل مادي

الوحدة الثالثة

مجموعة
الثايروستورات

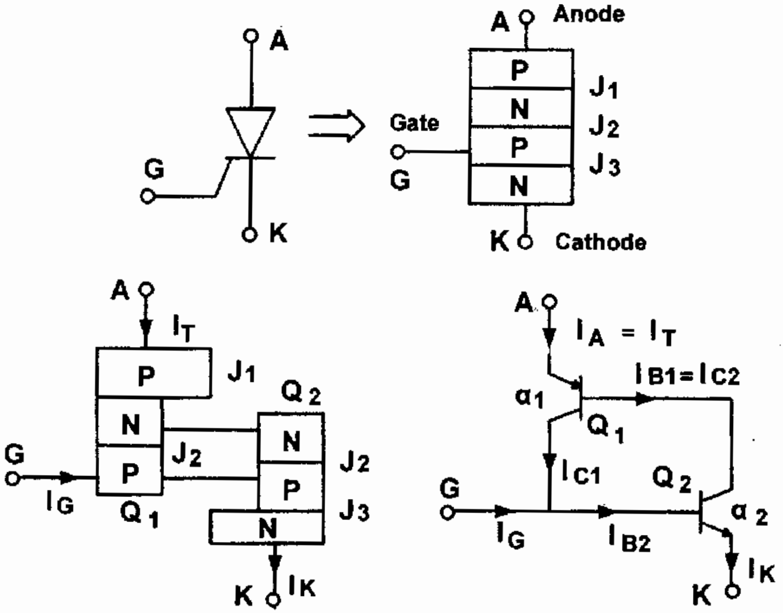
الوحدة الثالثة

الثايروستور

٣-١ - مجموعة الثايروستورات Thyristors Family

للثايروستورات مجموعة تضم عدد من عناصر إلكترونيات القدرة المستخدمة بشكل واسع في دوائر التحكم والتقويم. ومن أهم عناصر هذه المجموعة هي:-

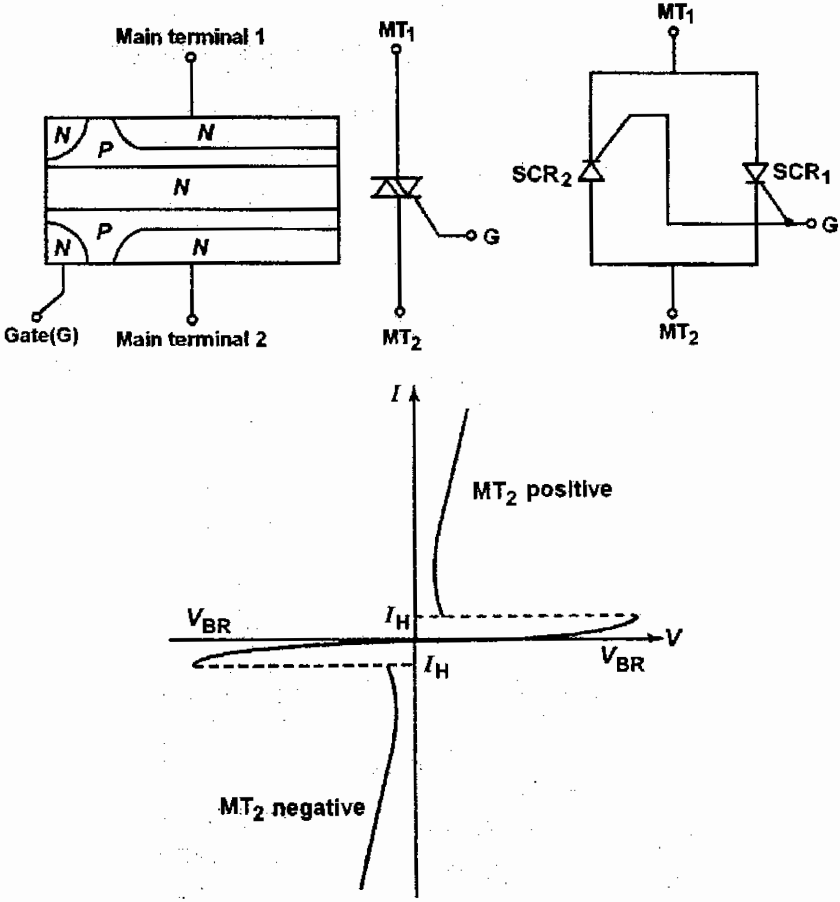
٣-١-١ - المقوم السيلكوني المتحكم به (Silicon-Controlled Rectifier):- وهو عبارة عن عنصر رباعي الطبقات ثلاثي الأطراف $(A),(K),(G)$، الشكل (٣-١) يبين خواص وتركيب هذا العنصر:-



الشكل (٣-١)

خواص وتركيب الثايروستور

٣-١-٢- الترياك (Triac):- عنصر ثلاثـــي الأطــراف $(G),(MT_2),(MT_1)$ ويتألف من أربعة طبقات. ويمرر التيار باتجاهين وهو عبارة عن ثايروســـتورين موصولين على التوازي. الشكل (٣-٢) يبين خواص وتركيب هذا العنصر.



الشكل (٣-٢)

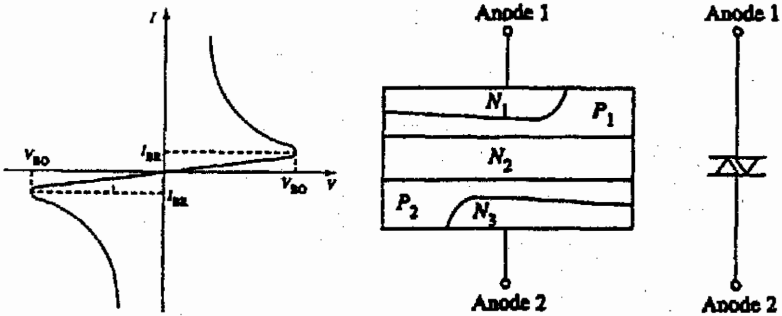
خواص وتركيب الترياك

ويختلف الترياك عن الثايرستور فيما يلي:-

١- يمكن لهذا العنصر التوصيل عندما تكون فولطية الطرف (MT_1) ذات قطبية موجبة أو سالبة، أما الثايرستور فلا يوصل التيار إلا أذا كانت فولطية طرف المصعد (A) ذات قطبية موجبة فقط.

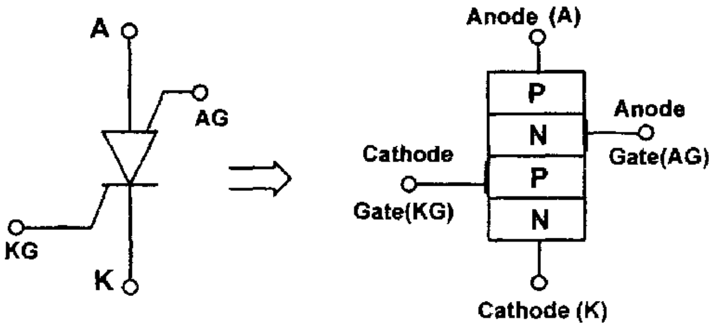
٢- يمكن لهذا العنصر التوصيل في الاتجاهين ويحقق ذلك بتطبيق فولطية بوابة مناسبة قد تكون ذات قطبية موجبة أو سالبة بالنسبة للطرف (MT_1)، أما الثايرستور فيوصل التيار عندما تكون فولطية البوابة موجبة بالنسبة لطرف المهبط (K).

٣-١-٣- **الدياك** (Diac):- عنصر رباعي الطبقات ثنائي الأطراف $(A_1),(A_2)$ ويكافئ الدياك زوجاً من ثنائيات شكوتكي موصولين على التوازي، وبشكل عكسي. وللدياك طرفان فقط، ويسمح للتيار بالمرور في كلا الاتجاهين ولا يحتاج إلى دائرة قدح، ويستخدم لقدح الترياك. والشكل (٣-٣) يبين خواص وتركيب هذا العنصر. يغلق الدياك في أي من الاتجاهين عن طريق زيادة الفولطية بين مصعدة ومهبطة إلى قيمة اكبر من جهد الانهيار الأمامي. فإذا كان الطرف ($Anode 1$) موصولاً بالقطب الموجب لمصدر التغذية والطرف ($Anode 2$) موصولاً بالقطب السالب لهذا المصدر وكانت قيمة الفولطية عالية فإن مسار التيار في العنصر يكون من ($Anode 1$) إلى ($Anode 2$) والعكس صحيح.

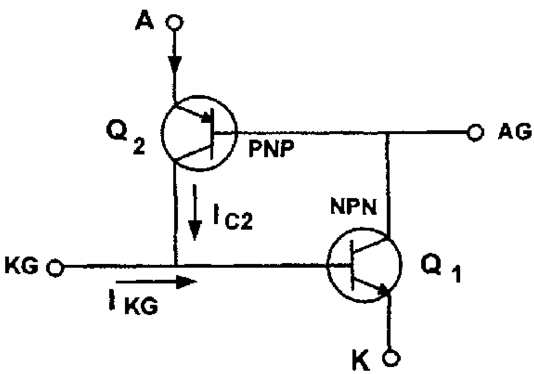


الشكل (٣-٣) خواص وتركيب الدياك

٣-١-٤- مفتاح المتحكم السيلكوني (Silicon-Controlled Switch):- وهذه العناصر تشبه المقوم السيلكوني المتحكم به ولكنها تحتوي على بوابتين ويمكن أن تتحول من حالة إلى أخرى بواسطة أي من البوابتين. والشكل (٣-٤) يبين رمز وخواص هذا العنصر.



أ – الشكل الرمزي

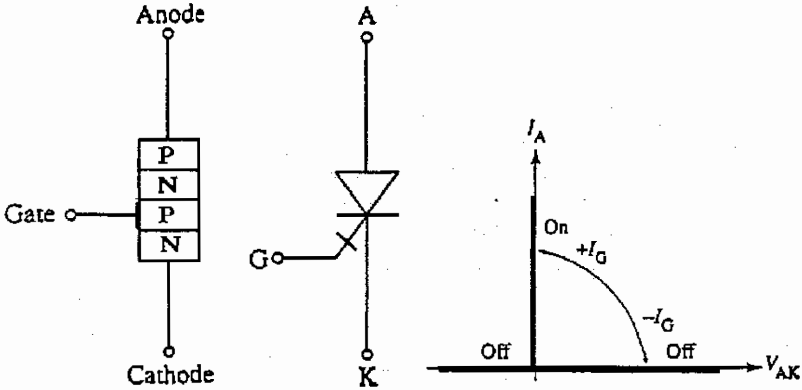


ب– الشكل التفصيلي

الشكل (٣-٤) شكل وتركيب مفتاح التحكم السيلكوني

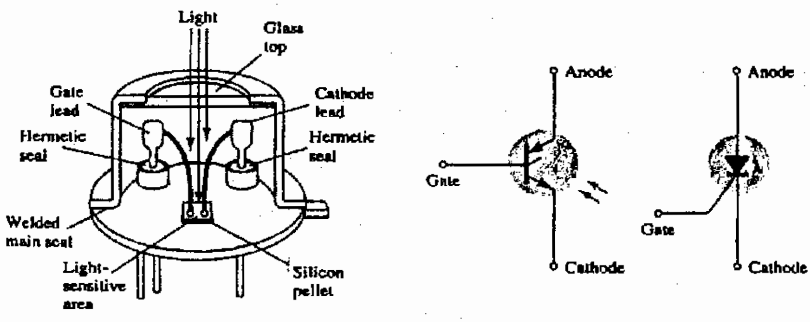
٣-١-٥- المفتاح السيلكوني ذو بوابة الإطفاء (Gate Turn-Off Switch)

(GTO):- وهو عنصر رباعي الطبقات ثلاثي الأطراف $(G),(K),(A)$. والشكل (٣-٥) يبين رمز هذا العنصر وخواص هذا العنصر.



الشكل (٣-٥)
رمز وخواص المفتاح السيلكوني ذو بوابة الإطفاء

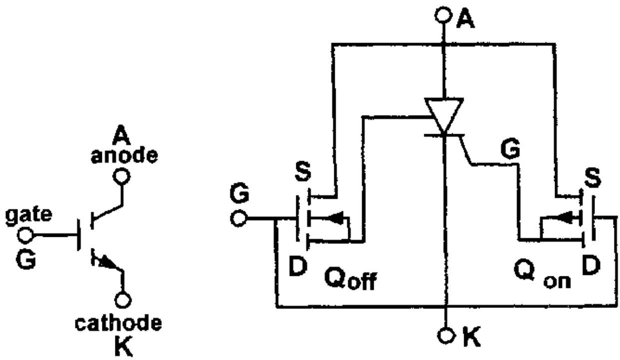
٣-١-٦- المقوم السيلكوني المتحكم والمنشط بواسطة الضوء (Light-Activated SCR) (LASCR):- ويتم تحويل هذا العنصر بواسطة الضوء. والشكل (٣-٦) يبين رمز وخواص هذا العنصر.



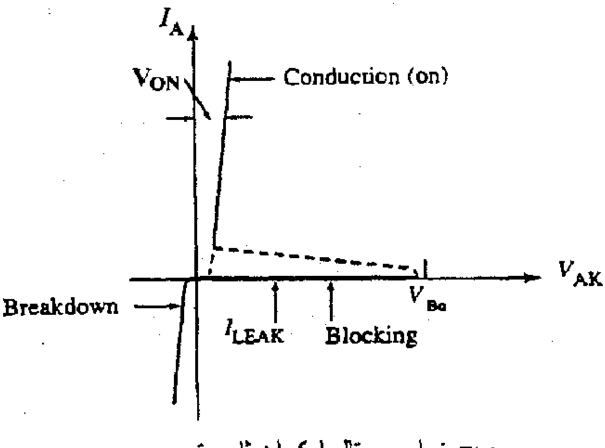
الشكل (٣-٦) رمز وخواص المقوم السيلكوني المتحكم والمنشط بواسطة الضوء

٣-١-٧- ميتال اوكسايد ثايروستور ((MCT) MOS-Controlled Thyristor):-

وهو عنصر يجمع بين خواص الـ(MOSFET) والـ (SCR) وهو عبارة عن (SCR) واثنان (MOSFET) موصولان مع بعضهما والشكل (٣-٧) يبين الرمز والتركيب وخواص هذا العنصر.



أ- رمز وتركيب ميتال اوكسايد ثايرستور



ب- خواص ميتال اوكسايد ثايرستور

الشكل (٣-٧)

٣-٢- مبدأ عمل المقوم السيليكوني المتحكم به (SCR):-

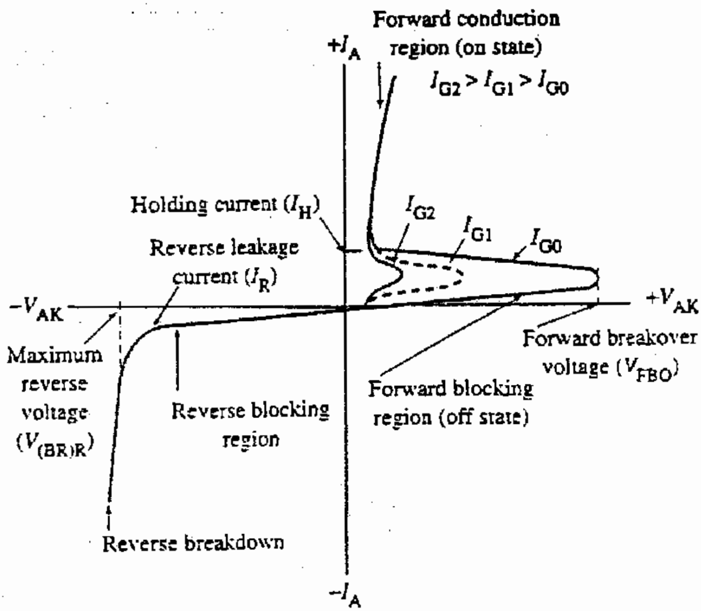
يمكن اعتبار المقوم السيليكوني المقاد وكأنة مؤلف من ثلاثة ديودات تؤلف ثلاث وصلات هي (J_3, J_2, J_1)، فإذا كان المصعد موجبا بالنسبة للمهــبط أي أن الوصلة (J_2) منحازة انحيازاً عكسياً، فإنه في هذه الحالة سوف يمر تيار قليل بين المصعد والمهبط ويدعى بتيار التسريب ويقال في هــذه الحالــة أن الثايروســتور (SCR) في حالة القطع الأمامي (Forward blocking State) أو في حالة القطع (Off-State).

إذا كان المهبط موجبا بالنسبة للمصعد فان الوصلات (J_3, J_1) في حالــة انحياز عكسي، وفي هذه الحالة سوف يمر تيار تسربي عكسي من المهــبط إلــى المصعد من خلال الثايروستور. وفي هذه الحالة يقال أن الثايروستور (SCR) فــي حالة القطع العكسي (Reverse Blocking State).

إذا تم زيادة الجهد بشكل تدريجي في حالة القطع الأمــامي فــان وصــلة الانحياز العكسي (J_2) سوف تنهار اعتماداً على زيادة الجهد على تلــك الطبقــة، حيث تزداد حاملات الشحنات في هذه الحالة.

وبما أن الوصلتان (J_3, J_1) ذات انحياز أمامي. ففي هذه الحالــة ســوف يكون هنالك حركة لحاملات الشحنة خلال الطبقات الثلاث مما يؤدي إلــى مــرور تيار كبير من المصعد إلى المهبط يدعى بالتيار الأمامي (I_T) ويكون هبوط الجهد (V_T) عبر العنصر هو هبوط جهد أومي عبر الطبقات الأربعة للثايروستور ويكون الثايروستور في هذه الحالة في حالة التوصيل (Conducting-State) أو (On-State) كما هو مبين من منحني خصائص (SCR) المبينة في الشكل (٣-٨). ويتم تحديد قيمة التيار بالاعتماد على الممانعة الخارجية (مقاومة خارجية). وإذا تم تخفــيض جهد وصلة المصعد_مهبط فان الثايروستور يبقى في حالة التوصيل حيث في هــذه

الحالة لا يوجد حاملات شحنة في الوصلة (J_2). وعندما يصل التيار الأمامي إلى قيمة اقل من التيار الحافظ (Holding Current) (I_h) فان حاملات الشحنة تبدأ في الظهور في الطبقة (J_2) ويعود الثايروستور في هذه الحالة إلى حالة القطع.



الشكل (٣-٨) منحني خصائص (SCR)

وعندما يكون الثايروستور في حالة التوصيل فان التيار الأمامي يكون أكبر من قيمة تدعى تيار الإمساك (Latching-Current) (I_L) وهذا ضروري من اجل تامين عدد حاملات الشحنة التي تنتقل من خلال الوصلات، وعكس ذلك فان الثايروستور سوف ينتقل إلى وضع القطع في حالة انخفاض جهد الوصلة بين المصعد-المهبط. ويكون تيار الحافظ اقل وقريب من تيار الإمساك وهو بحدود (mA).

الثايروستور (SCR) يكون منحازاً انحيازاً عكسياً عندما يكــون المهــبط موجبا بالنسبة للمصعد. وفي هذه الحالة يتصرف الثايروستور كديودين موصولان على التوالي ومطبق عليهما جهد انحياز عكسي. وفي حالة الانحياز الأمامي فــان الوصلة (J_2) تكون أكبر سماكة من مجموع سماكة الطبقتين (J_3, J_1) في حالــة الانحياز العكسي.

الجهد (V_{BO}) وهو جهد الانهيار الأمامي يكون أكبر من (V_{BR}) وهو جهد الانهيار العكسي. وتيار الانهيار الأمامي (عند جهد الانهيار الأمامي) يرمــز لــه بالرمز (I_B).

مما سبق يمكن تلخيص عمل الثايروستور على النحو التالي:-

١- للثايروستور (SCR) حالتي عمل هما (Off-State) و (On-State).

٢- التحويل من (Off-State) إلى (On-State) يدعى بــــ (Turn-On) ويــتم ذلــك بزيادة جهد الانحياز الأمامي بقيمة اقل من (V_{BO}).

٣- التحويل من (On-State) إلى (Off-State) تدعى بـــ (Turned-Off) ويتم ذلــك بتقليل قيمة التيار إلى قيمة أقل من (Holding Current) (I_h).

٤- وهنالك طريقة أسهل لتحويل الثايروستور من حالة إلى أخرى وذلك بالتحكم في بوابة الثايروستور. وتدعى هذه الطريقة بالتحكم بالبوابة (Gate-Control).

وفي حال تطبيق جهد أمامي أقل من (V_{BO}) على الثايروستور فإنه يمكــن تحويله إلى حالة الوصل بتطبيق جهد موجب بــين البوابــة والمهــبط. ويمتــاز الثايروستور بأنة يمكن تحويله من وضع إلى أخر، ويمتاز كذلك بالثبات في الحالة الموجود فيها وبسرعة التحويل من وضع إلى أخر وبضياعات مهملة.

التطبيقات التي يستخدم الثايروستور فيها:-

١- التحكم بسرعة محركات التيار المتناوب والتيار المستمر.

٢- أجهزة التحكم بدرجات الحرارة.

٣- دوائر توقف وفرملة آلات التيار المتناوب والتيار المستمر.

٤- دوائر التحويل من التيار المستمر إلى المتناوب بترددات مختلفة.

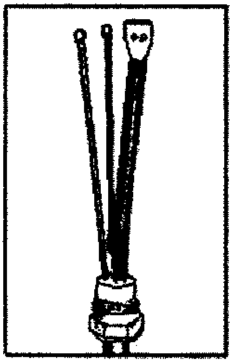
٥- دوائر العاكس، التحويل من جهد ثابت إلى جهد متغير.

٦- دوائر التقويم المحكوم.

٣-٣- استمارة البيانات للثايرستور Thruster Data Sheets

استمارة البيانات النموذجية للثايرستور تظهر في الشكل (٣-٩) وفي الشكل (٣-١٠) لنفس الثايرستور. إن أسلوب عرض المعلومات في هذه الاستمارة تختلف من شركة إلى أخرى. وتعطى مواصفات الثايرستور بشكل مفصل من خلال الجداول والرسومات البيانية، والتطبيق الصحيح الذي يعمل عنده الثايرستور يكون بفهم دلالات استمارات البيانات.

أن الثايرستور سوف يؤدي الخدمة المطلوبة منه بشكل مرضٍ أذا تم حمايته من العطب العائد إلى الحرارة الزائدة لأجزائه وبخاصة الوصلة (Junction). إن المصدر الرئيس للحرارة في الوصلة عند ترددات القدرة ناتج من خسائر التوصيل. بالنسبة للثايروستور المخصص في الشكل (٣-١٠)، يكون مدى درجة حرارة الوصلة (T_j) المسموح بها اكبر من $(-40\,^{\circ}C)$ واقل من $(125^{\circ}\,C)$.



The Westinghouse Type 261 Series Features

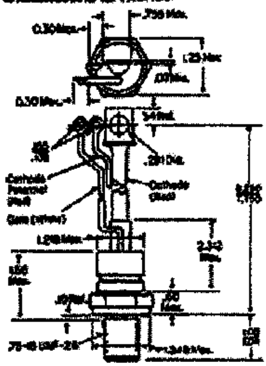
- All diffused design
- Guaranteed dv/dt (300V/μsec)
- Low gate current
- Guaranteed value of di/dt
- Low thermal impedance
- High surge current capability

The exclusive Westinghouse CBE construction technique provides a thermal fatigue-free device by eliminating solder joints. In addition, the entire series carries the Westinghouse lifetime guarantee.

Westinghouse Lifetime Guarantee

[illegible]

Dimensions in Inches



	Symbol	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Repetitive Peak Forward and Reverse Voltage,① volts	V_{DRM}, V_{RRM}	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Non-repetitive Transient Peak Forward and Reverse Voltage, volts ≤5.0 msec.	V_{DSM}, V_{RSM}	200	300	400	500	600	700	850	950	1100	1200	1300	1400	1500	1700	1800
Peak Forward and Reverse Leakage Current, mA	I_{DM}, I_{RM}	15														

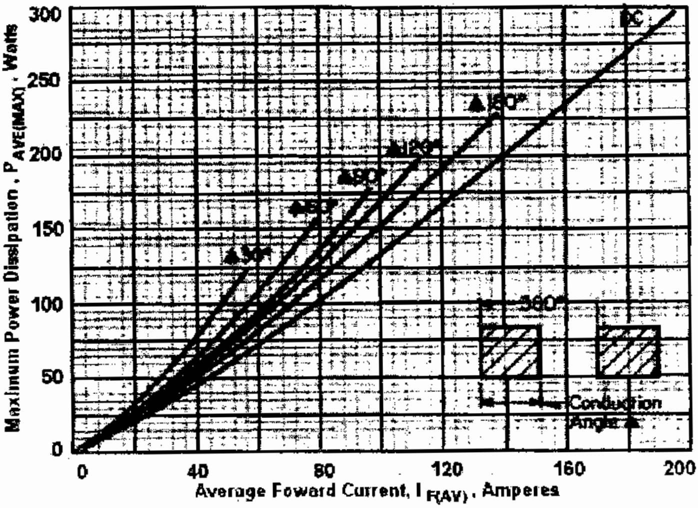
Conducting State (T_J=125°C)	Symbol	All Types
RMS Forward Current, amps	$I_{T(RMS)}$	200
Ave. Forward Current (180° Conduction), amps	$I_{T(AV)}$	128
Surge Current (at 60 Hz): ½ Cycle, amps	I_{TSM}	3,300
3 Cycles, amps	I_{TSM}	2,400
10 Cycles, amps	I_{TSM}	2,000
I^2t for Fusing (at 60 Hz half-wave), amp²-sec	I^2t	45,000
Forward Voltage Drop at T_J=25°C		
I_T=100 Adc, volts	V_T	1.40
I_T=625 Adc, volts	V_T	2.05
Thermal Characteristics		
Oper. Junction Temp. Range, °C	T_J	−40 to +125
Storage Temperature Range, °C	T_{stg}	−40 to +150
Max. Thermal Impedance, °C/Watt:		
Junction to Case	$R_{θJC}$	0.16
Case to Sink, Lubricated	$R_{θCS}$	0.075
Max. Thread Torque, Lubricated, in-lbs.	....	240

① For higher voltages refer to Westinghouse.

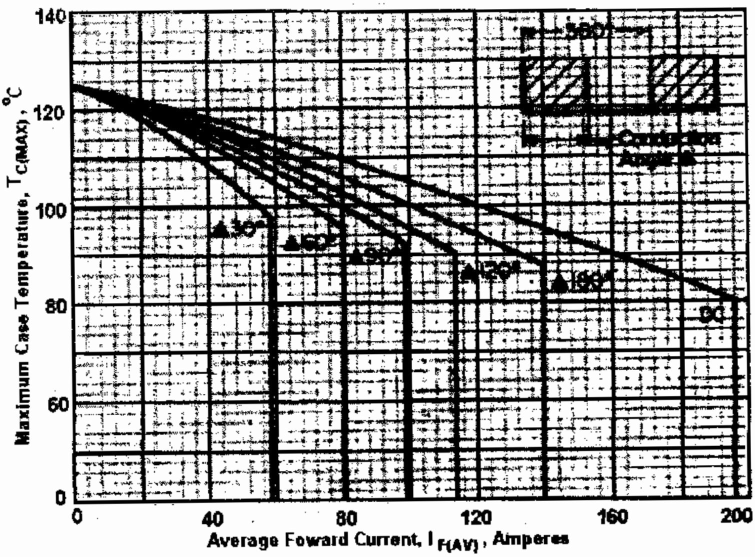
Gate Parameters (T_J=25°C)	Symbol	All Types
Gate Current to Trigger (V_{FD}=12V), mA	I_{GT}	150
Gate Voltage to Trigger (V_{FD}=12V), volts	V_{GT}	3
Non-Triggering Gate Voltage at T_J=125°C (Rated V_{DRM}), volts	V_{GDT}	0.15
Peak Forward Gate Current, amps	I_{GFM}	4
Peak Reverse Gate Voltage, volts	V_{GRM}	5
Peak Gate Power, watts	P_{GM}	16
Average Gate Power, watts	$P_{G(AV)}$	3
Switching State		
Typical Turn-On Time, I_T=100A, 10-90%, V_{FD}=10 volts②, T_J=25°C, μsec	t_{on}	5.0
Min. di/dt, Linear to 5.0 I_{GT}② amps/μsec	di/dt	100
Typical Turn-Off Time, I_T=150A, T_J=125°C, di_R/dt=5.0A/μsec., dv/dt=20V/μsec. Linear to .8 V_{DRM}, μsec	t_{off}	60
Min. dv/dt, Exp. to Full V_{DRM}, volts/μsec	dv/dt	300

① Applies for zero or negative gate voltage.
② With recommended gate drive. See AD 54-600.

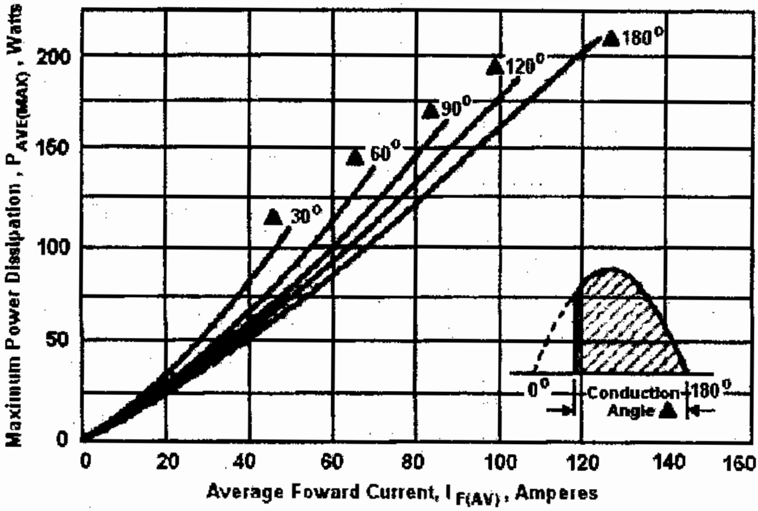
الشكل (٣-٩) استمارة البيانات النموذجية للثايرستور



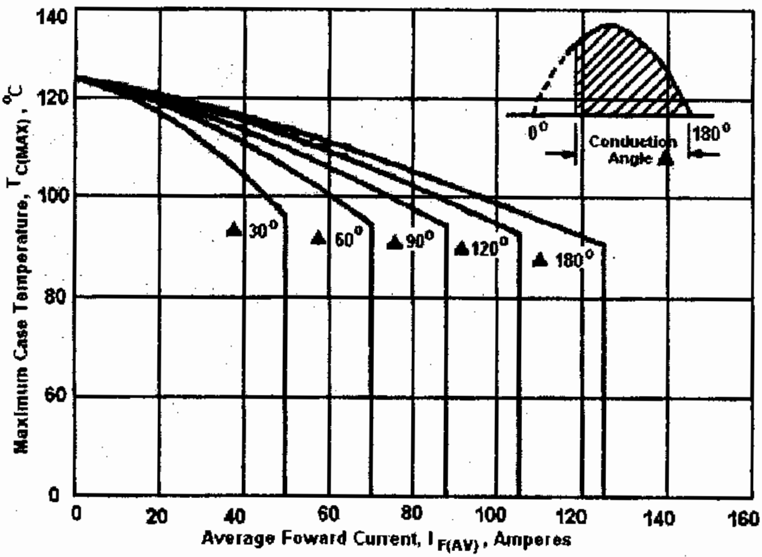
الشكل (٣-١٠-A)



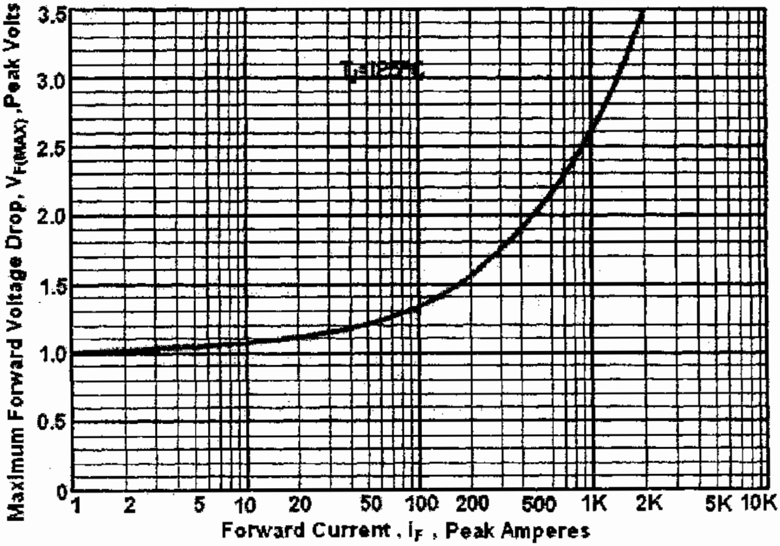
الشكل (٣-١٠-B)



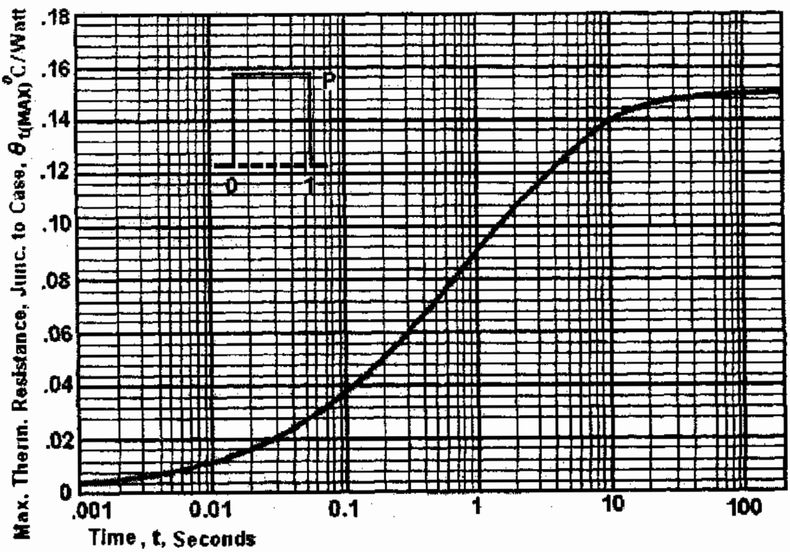
الشكل (٣-١٠-C)



الشكل (٣-١٠-D)



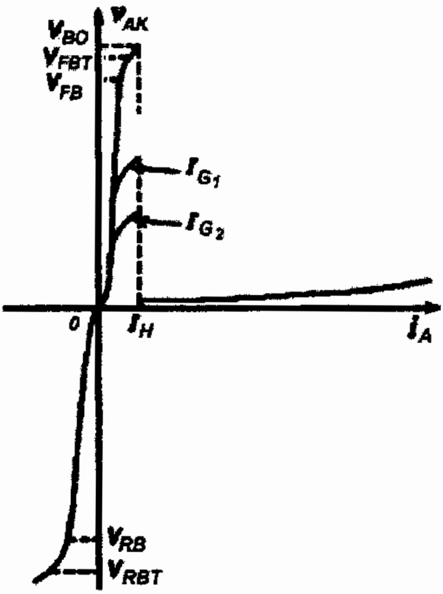
الشكل (٣-١٠-E)



الشكل (٣-١٠-F)

٣-٣-١- الفولطية المحددة Specified voltage

الكثير من القيم الكهربائية المحددة في الشكل (٣-١٠) تعطى لأسوء حالة محتملة والتي تكون فيها درجة حرارة الوصلة (T_r) عند القيمة العظمى المسموح بها. حيث تكون القيمة التكرارية لفولطية المنع الأمامية (V_{FB}) والقيمة التكرارية للفولطية العكسية (V_{RR}) عند هذه الحرارة. وتظهر أسماء ومواقع هذه الكميات على منحنى خصائص الفولطية والتيار للثايرستور في الشكل (٣-١١). إذا سمح لدرجة حرارة الوصلة بالارتفاع فوق الحد الأعظم فإن هنالك خطورة من انهيار الوصلة عند قيمة الفولطية المحددة لفترة زمنية قصيرة محددة بـ$(5\ ms)$ كما يظهر في الشكل (٣-٩)، وبالتالي فإن الثايرستور سيمنع بطريقة سليمة تزايد الفولطية الأمامية أو العكسية (V_{RBT}) أو (V_{FRT}).



الشكل (٣-١١)

منحنى خواص التيار- فولطية للثايرستور

(V_{BO}) فولطية الانهيار التي يبدأ عندها الثايرستور بالتوصيل في الاتجاه الأمامي عند درجة حرارة عظمى محددة. تزود هذه الفولطية من دائرة خارجية، حيث أن التيار الناتج يكون عند قيمة محددة لا تتسبب في عطب الثايرستور. وفي الحقيقة تُعد هذه الطريقة إحدى طرق قدح الثايروستور المستخدمة في التطبيقات العملية. إن قيمة كبيرة للتيار العكسي نتيجة تجاوز الفولطية العكسية لـ(V_{RBT}) دائما تتسبب في تحطم الثايرستور. إن الفولطية التي يكون عندها الثايرستور في حالة التوصيل في الإتجاه الأمامي تعتمد على مقدار تيار البوابة المشار إليه في الشكل (٣-١١)، حيث (I_{G2}) أكبر من (I_{G1}).

٣-٣-٢- محددات تيار المصعد ومبددات الحرارة

Anode current and heat sink specification

إن التطبيق الصحيح للثايرستور يكون بالاختيار الصحيح للتيار المقرر بحيث لا يعمل على زيادة مفرطة بدرجة حرارة الوصلة، ويكون ذلك بفهم عملية التسخين في ذلك الجهاز. القيمة الفعالة العظمى للتيار الأمامي (I_R) مبينة في الشكل (٣-١٠)، تحدد لمنع الحرارة المفرطة في عناصر المقاومة للثايرستور. مثال ذلك الإطراف ونقاط التوصيل (leads and joints). الارتفاع في حرارة الوصلة نتيجة مفاقيد التوصيل الأمامية تنتقل إلى غلاف الثايرستور، ومن ثم إلى مبدد الحرارة ومن مبدد الحرارة إلى الجو المحيط. الفرق في درجات الحرارة بين الوصلة والجو المحيط عند ظروف الحالة الثابتة (Steady-State Condition) تعطى بالمعادلة التالية :

$$T_J - T_A = P_{AVE}\,(\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}) \qquad (3.1)$$

T_A : درجة حرارة الجو المحيط.

θ_{JC} ,θ_{CS} : الممانعات الحرارية والمحددة في الشكل (٣-٩).

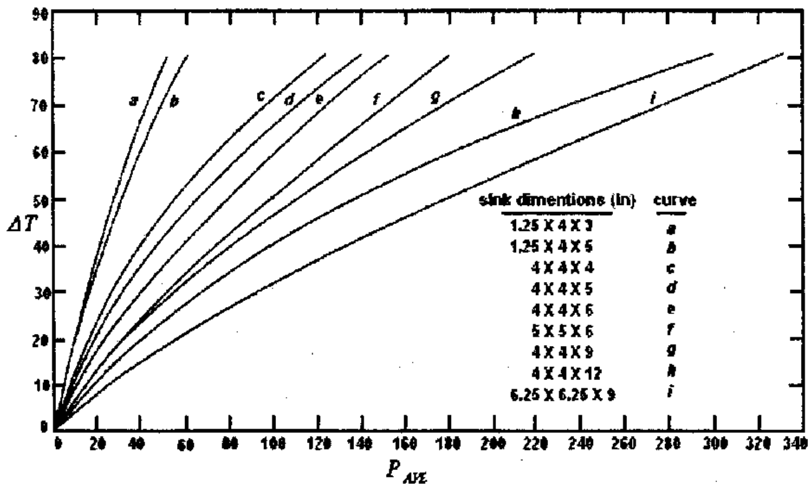
P_{AVE} : القيمة المتوسطة للطاقة الحرارية المتولدة بالواط.

θ_{SA} : الممانعة الحرارية بين مبدد الحرارة والجو المحيط. وهي خاصية من خواص المبدد وليست من خواص الثايرستور. وعلاوة على ذلك هي قيمة ليست ثابتة وتعتمد على نوع مادة المبدد الحراري والمعالجة الحرارية للسطح والحجم والفرق في درجات الحرارة بين المبدد والجو المحيط. بيانات مبدد الحرارة متوفرة من الشركات المصنعة بأشكال مختلفة. والشكل (٣-١٢) يعود إلى سلسلة من مبددات الحرارة لمقذوف الألمنيوم (Extruded Aluminum) والمنحنى يعطي العلاقة بين (ΔT) و (P_{AVE}). القدرة الحرارية المبددة بالواط حيث:

$$\Delta T = T_S - T_A \qquad (3.2)$$

T_S : درجة حرارة مبدد الحرارة.

T_A : درجة حرارة الوسط المحيط.



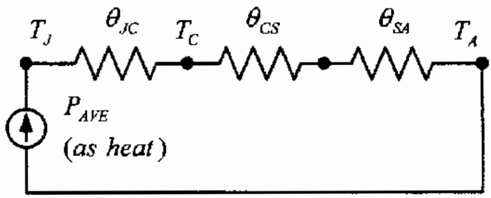
الشكل (٣-١٢)

سلسلة مبددات الحرارة لمقذوف الألمنيوم(extruded aluminum)

عند أي نقطة على المنحنى فإننا نقرأ قيمة كل مـــن (ΔT) و (P_{AVE}) ومـــن ثـــم نحسب:

$$\theta_{SA} = \frac{\Delta T}{P_{AVE}} \qquad (3.3)$$

بدلا من ذلك إذا كانت القدرة المبددة معروفة، فإنه يمكن الحصول على (ΔT) لأي اختيار للمبدد. يظهر في الشكل (٣-١٣) الدائرة الحرارية المكافئة.



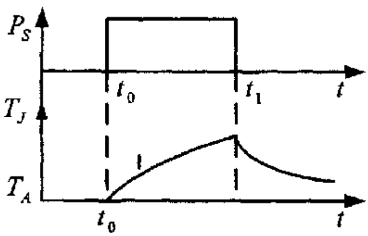
الشكل (٣-١٣)

الدائرة المكافئة الحرارية

في هذه الدائرة قيمة كلا من (θ_{JC}) و (θ_{CS}) تحدد فـــي اســـتمارة البيانـــات للشكل (٣-٩). بينما (θ_{SA}) تؤخذ من البيانات المكافئة للمنحنيات المبينة في الشكل (٣-١٢).

إذا كان تيار المصعد (I_A) للثايرستور تيار مباشر ثابـــت فـــإن العلاقـــة بين (P_{AVE}) وقيمة التيار المباشر تؤخذ من المنحنى المعلّم بـــ (DC) في الرســـم البياني في الشكل (٣-١٠-A) والقيمة المسموح بها لـــ (P_{AVE}) يمكن الحـــصول عليها من المعادلة(٣-١)، حيث أن (T_J) يوضع بدلا منها القيمة العظمى المحـــدد بـــ $(125^o\,C)$، والقيمة المسموح بها للتيار المباشر تقرأ من المنحنى. أما إذا كـــان تيار المصعد للثايرستور سلسلة من النبضات، كالناتجة من دائرة التقويم المحكـــوم فإن استبدال التيار المتوسط الأمامي بالتيار المباشر في الإجراءات اللاحقة لا يكون مقبولا.

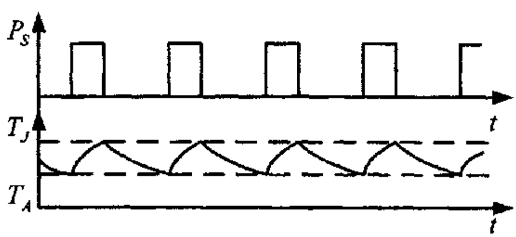
والسبب في ذلك أن الثايرستور له سعة حرارية صغيرة ودرجة حرارة تتغير بشكل دوري عند ترددات القدرة. يظهر في الشكل (٣-١٤) التغيرات في درجة حرارة الوصلة نتيجة لإشارة نبضة لتيار المصعد.



الشكل (٣-١٤)

التغيرات في درجة حرارة

إن (T_J) تزداد بشكل أسي من بداية إلى نهاية النبضة ومن ثم تتناقص بشكل أسي إلى القيمة (T_A). إن سلسلة من النبضات المستطيلة تنتج موجة من (T_J) والتي عند ظروف الحالة الثابتة ستكوّن قطاع المنحنى الأسي الموضح في الشكل (٣-١٥).



الشكل (٣-١٥)

دورة التغيرات لدرجات الحرارة

إن القيمة الصغرى لـ(T_J) لدورة التغيرات الظاهرة في الشكل (٣-١٥) تكون أكبر من (T_A)، وأعلى قيمة يجب أن لا تزيد عن محدد القيمة العظمى لـ(T_J). لهذا بالعودة إلى سرعة تغير (T_J) عندما يبدأ (I_A) بالتدفق، فإن القيمة المتوسطة لـ(i_A) للموجة المستطيلة في حال أن قيمة (T_J) تصل إلى$(125^o\, C)$ تكون اقل من قيمة التيار المباشر في حال (T_J) ترتفع إلى $(125^o\, C)$. لهذا فإنه من الضروري تقرير القيمة الأقل لمتوسط ألتيار الأمامي للثايرستور$(I_{F(AV)})$عندما يوصل الثايرستور موجة مستطيلة بدلا من التيار الثابت. هذه الاعتبارات تعطي ارتفاعاً للمنحنيات كما يظهر في الشكل (٣-١٠-A).

سماحية القيمة المتوسطة للتيار الأمامي للموجة المستطيلة عند زاوية التوصيل (Conduction angle) المعطاة يمكن الحصول عليها من المنحنى المناسب في الشكل (٣-١٠). لهذا أذا كان لإتحاد الثايروستور_ والمبدد الحراري قدرة لتبديد $(100\, W)$عند القيمة المعطاة لـ (T_A) مع $(T_J = 125^0\, C)$، فإن التيار الذي يمكن تحمله يكون $(80\, A)$. ولكن في حال كون التيار موجة مستطيلة يكون فيها وقت التوصيل وعدم التوصيل متساوٍ، وزاوية التوصيل المعطاة (180^0)، فإن قيمة $(I_{F(AV)})$ يجب تخفيضها تقريبا إلى $(70\, A)$.

يظهر الرسم البياني للشكل (٣-١٠-E) أن المقاومة الأمامية للثايرستور ثابتة. يفسر هذا العامل العلاقة الخطية بين $(P_{AVE(MAX)})$و $(I_{F(AV)})$. تقدير معطيات الثايرستور عند قيمة (DC) تكون اكبر عندما تكون نبضات التيار جزءً من الموجة الجيبية عنه في حال الموجة المستطيلة. وهذا عائد إلى إرتفاع معامل الشكل للموجة الجيبية (Form factor). لقيم معطاة لـ $(I_{F(AV)})$ وزاوية توصيل، فإن للموجة الجيبية قيمة ذروة أعلى من النبضات المستطيلة، والسماحية المعطاة لهذا العامل تؤخذ من المنحنيات الموجود في الشكل (٣-١٠-C). في هذه المنحنيات فإن

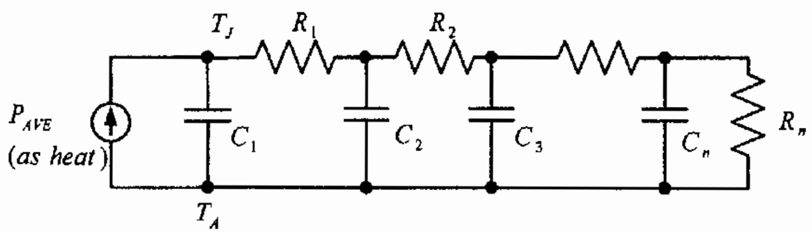
قيمة $\left(I_{F(AV)}\right)$ عند زاوية التوصيل المعطاة وقيمة $\left(P_{AVE(MAX)}\right)$ تكون أقل منه في حال الموجة المستطيلة لنفس القيمة المتوسطة وزاوية التوصيل. تحدد قيمة التيار المقرر للثايرستور من خلال المعادلات (٣-١) إلى (٣-٣) والمنحنى المناسب لـ $\left(P_{AVE(MAX)}\right)$ و $\left(I_{F(AV)}\right)$ وبمعرفة درجة حرارة الجو المحيط والمقاومة الحرارية بين المبدد والجو المحيط، إذا تم تحديد هذه القيم فإن التيار المقرر يمكن تحديده من المنحنيات في الشكل (٣-١٠-D-B). وذلك من خلال قيم $\left(T_C\right)$، وهكذا إذا كان $\left(I_{F(AV)}\right)$ معروفاً، فإن درجة حرارة الغلاف العظمى تقرأ من المنحنى المناسب ومن ثم نحسب.

$$P_{AVE(MAX)} = \frac{125 - T_{C(MAX)}}{\theta_{JC}} \qquad (3-4)$$

إذا كانت درجة حرارة المحيط محددة، فإنه يمكن الحصول على قيم $\left(\theta_{SA}\right)$ من المنحنيات في الشكل (٣-١٢). أو البيانات المصنعية لمكافئات المبددات الحرارية.

٣-٣-٣- تيار القوس الكهربائي Surge Currents

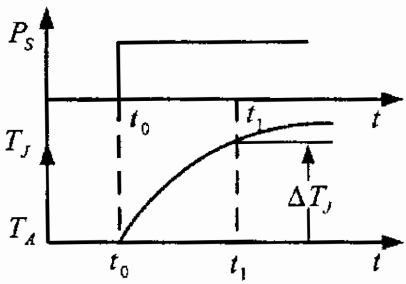
بسبب وجود سعات حرارية بين الوصلة والغلاف والمبدد الحراري فإن درجة حرارة الوصله تحتاج إلى فترة زمنية للوصول إلى الحالة المستقرة. والدائرة الحرارية المكافئة والمبسطة والتي تمثل سلوك الحالة العابرة تظهر في الشكل (٣-١٦).



الشكل (٣-١٦)

الدائرة الحرارية المكافئة والمبسطة

حيث (P_S) تمثل مجمل القدرة على شكل حرارة تزود إلى الوصلة. إذا طبقت هذه القدرة كدالة خطوة على مدخل الدائرة فإن درجة الحرارة تزداد بشكل أسي كما في الشكل (٣-١٧). على فرض أن الزمن اللحظي كما في الشكل (٣-١٧) يساوي (t_1) فإن درجة حرارة الوصلة تزداد بمقدار (ΔT_J) وبقسمة هذا المقدار على قدرة الدخل (P_S) فإننا نحصل على المقاومة الحرارية اللحظية (θ_t) عند الزمن $(t = t_1 - t_2)$. وبتغيير قيمة (t) فإننا نحصل على قيم متغيرة للمقاومة الحرارية اللحظية والتي يمكن رسمها كما يظهر في الشكل (٣-١٠-F). وعندما تصبح قيمة (t) أكبر ما يمكن فإن قيمة (θ_t) تساوي (θ_{JC}).



الشكل (٣-١٧)

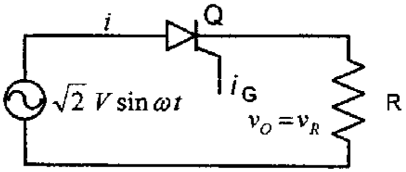
درجة الحرارة تزداد بشكل أسي

تكمن أهمية المقاومة الحرارية اللحظية في أن الثايرستور لحظة تشغيله لفترة زمنية قصيرة (t) تكون المقاومة الحرارية اللحظية صغيرة جدا ويمر تيار عالي يسمى تيار القوس الكهربائي. وكلما زاد الوقت زادت المقاومة وقل تيار القوس الكهربائي.

نجد في استمارة البيانات للثايرستور ثلاث قيم لـ (I_{FM}) عند فترات زمنية مختلفة للقوس الكهربائي. إذا حصل خطأ في النظام عندما يكون الثايرستور في حال التوصيل، فإن الجهاز المقاد بواسطة الثايرستور يصلة تيار حمل زائد

عالي جداء وحيث أن الثايرستور يعمل بشكل طبيعي عند درجة الحرارة العظمى للوصلة، فإن درجة الحرارة تبدأ في الارتفاع فوق القيمة العظمى المحددة في المعطيات والتي تعمل على عطب الثايرستور. تحدد قيمة $(I^2 t)$ عند بقاء حمل زائد لأقل من نصف دورة. ويفيد ذلك في اختيار القاطع المناسب لحماية الثايرستور.

مثال (٣-١):- للدائرة المبينة في الشكل (٣-١٨) فإن $(V = 220V)$، $(R=1\Omega)$، زاوية التأخير $(\alpha=0)$، درجة حرارة المحيط تساوي $(40^o C)$، (Q) للثايرستور المحددة خواصه في الشكل (٣-١١)، إذا كانت $\theta_{CS} = 0.07\, C^o / watt$.



الشكل (٣-١٨)

١- أختر مبدد الحرارة المناسب من المتسلسلات الموضحة في الشكل (٣-١٢).

٢- احسب كفاءة الدائرة.

الحل:-

زاوية التوصيل $(\gamma = 180^o)$، والقيمة المتوسطة للتيار المقوم تحسب من:-

$$I_O = \frac{\sqrt{2}\,V}{R\pi} = \frac{220\sqrt{2}}{1\times\pi} \cong 100\,A$$

من الرسم البياني في الشكل (٣-١٠-D)، $(T_{C(MAX)})$تساوي(98^o)، ومن الرسم البياني في الشكل (٣-١٠-C)، فإن قيمة $(P_{AVE} = 160W)$، لذلك فإن درجة حرارة المبدد تساوي:

$$T_S = T_C - P_{AVE} \times \theta_{CS} = 98 - 160 \times 0.075 = 86^o C$$

$$\Delta T = T_S - T_A = 86 - 40 = 46^o C$$

من الشكل (٣-١٢) يكون المنحنى (i) المحدد لأبعاد المبدد الحراري المطلوب وهذه الإبعاد هي $(6.25 \times 6.25 \times 9 \ (Inch))$.

إن قدرة الخرج تساوي :

$$P_O = R\ I_R^{\ 2} = V_R^{\ 2} / R$$

$$V_R = V/\sqrt{2}$$

$$P_O = V^2/2R = \frac{(220)^2}{2} = 24.2 \times 10^3 \ \ W$$

القدرة المبددة في الثايرستور $(160\ W)$.

$$efficiency = 24.2 \times 10^3 / 24.2 \times 10^3 + 160 = 0.997 \ \ pu$$

مثال (٣-٢):- للدائرة في المثال (٣-١) باستخدام مبدد الحرارة المختار، أحسب درجة حرارة الغلاف والوصلة إذا كانت زاوية التأخير $(\alpha = 120^o)$. إذا كانت $\theta_{JC} = 0.15 \ \ C^o / watt$.

الحل:-

زاوية التوصيل $(\gamma = 60^o)$، والقيمة المتوسطة لتيار المقوم:

$$I_o = \frac{V}{\sqrt{2}\,\pi R}(1 + \cos\alpha)$$

$$= \frac{220}{\sqrt{2}\ \ \pi \times 2} \cong 25\,A$$

من الشكل (C-١٠-٣)، $P_{AVE} = 45\ W$

ومن الشكل (٣-١٢)، على المنحني (i)، لـ$(P_{AVE} = 45\ W)$ فإن $(\Delta T = 16^o\ C)$، ودرجة حرارة المبدد تكون:-

$$T_S = T_A + \Delta T = 40 + 16 = 56^o C$$

درجة حرارة الغلاف تساوي:-

$$T_C = T_S + P_{AVE}\ \theta_{CS} = 56 + 45 \times 0.075 = 59.4^o C$$

وتكون درجة حرارة الوصلة :-

$$T_J = T_C + P_{AVE} \times \theta_{JC} = 59.4 + 45 \times 0.15 = 66.4^o C$$

٣-٣-٤- تحديد قيمة تغير تيار المصعد (di/dt)

عند تطبيق جهد أمامي على الثايرستور، وتم قدحه بواسطة تيار بوابة، فإن تيار التوصيل للمصعد المار عبر الوصلة يبدأ مباشـرة بالانتـشار فـي المنطقـة المجاورة لطرف البوابة ومن هناك ينتشر إلى جميع مناطق الوصلة.

لهذا يصمم الثايرستور بحيث تكون منطقة انتشار التوصيل سريعة قدر ألإمكـان. وعلى الرغم من هذا، إذا كان معدل إرتفاع تيار المصعد (di/dt) كبير فإن بقعة ساخنة (hot spot) ستتشكل في المنطقة المجاورة لطرف البوابة وذلك بسبب إرتفاع كثافة التيار في ذلك الجزء من الوصلة الذي يبدأ في التوصيل. ومن أجل تخفـيض قيمة(di/dt) إلى قيمة مقبولة فإنه يوضع في دائرة المصعد محاثه صغيرة، وعند عمل ذلك، فإن الوقت الذي يأخذه الجهاز للفتح على التوصيل الكامل يحـدد بـ (t_{on}). إن الطريقة الوحيدة للتأكد من سرعة انتشار منطقة التوصيل تكون بتطبيق تيار بوابه أكبر من قيمة صغرى محددة بـ (I_{GT}).

٣-٣-٥- تحديد قيمة تغير الجهد $\left(\frac{dv}{dt}\right)$:-

ارتفاع معدل زيادة الفولطية الأمامية يؤدي إلى توصيل الثايرستور حتـى وإن كان تيار البوابة يساوي صفرا. وحيث انه نتيجة لفتح وغلق الدائرة الكهربائية

في الحالات العابرة تنتج فولطية عابرة تزيد ذروتها عن فولطية التغذية وقد تؤدي إلى تلف الثايرستور خلال فترة زمنية قصيرة، لهذا يجب حماية الثايرستور من إرتفاع هذه الفولطية العابرة ويستخدم لذلك دوائر توهين (Snobbery circuit) مكونة من مقاومة (R_S) ومكثف (C_S) (يوصلان على التوازي مع الثايرستور) لمنع التغير السريع في الفولطية، حيث يعمل المكثف في حال غلق الدائرة على الحد من (dv/dt) وعند فتح الدائرة فإن المقاومة (R_S) تحد من تيار التفريغ.

من استمارة البيانات الواضحة في الشكل (٣-١٩)، فإن هنالك بعض المعالم المهمة والضرورية والتي تمكننا من اختيار الثايرستور وهي:-

I_T : القيمة العظمى لتيار الثايرستور في حالة التوصيل.

$I_{T(AV)}$: القيمة المتوسطة العظمى لتيار الثايرستور في حالة التوصيل.

$I_{T(rms)}$: القيمة الفعالة العظمى لتيار الثايرستور في حالة التوصيل.

V_{DRM} : ذروة الفولطية الأمامية المتكررة في حال الغلق (off-state) آو بمعنى آخر القيمة القصوى للفولطية الأمامية والتي يمكن للثايرستور تحملها بصورة متكررة خلال فترات زمنية قصيرة بحيث لا يتحول إلى حالة التوصيل (يستخدم الحرف (F) بدلا من (D) أحيانا).

Nominal current rating I_T (amps mean at 85 °C base)	V_{RSM} and V_{DSM} (peak volts × 10^3)	V_{RRM} and V_{DRM} (peak volts × 10^3)	ON-state voltage V_T (volts at $3 \times I_T$)	I_{TSM} (10 ms, peak amps × 10^3)	I^2t (10 ms, 125 °C amp² sec × 10^3)	Thermal resistance junction/base (°C/watt)	Type of encapsulation	$\frac{dv}{dt}$ max (volts/μs)	$\frac{di}{dt}$ max (amps/μs)	t_q max (μs)	I_{GT} to fire (mA)	$\frac{I_L}{I_H}$ (typical) (mA)
1–10	0–1·5	0–1·4	1·5–2·5	0·01–0·2	0·0005–0·2	50–2	Screwed base	100	100	100	5–60	25
10–50	0–1·5	0–1·4	1·5–2·5	0·1–1·0	0·05–5	2–0.5	Screwed base	200	100	100	100	100
50–100	0–1·5	0–1·4	1·5–2·0	1–2	5–20	0·5–0·2	Flat or screw base	200	100	150	150	100

الشكل (٣-١٩) استمارة بيانات

V_{RRM}: ذروة الفولطية العكسية المتكررة في حال الغلق.

I_{GT} : تيار قدح البوابة الـ(DC)(تعطى القيمة الصغرى والعظمى)

I_{DRM} : ذروة التيار الأمامي المتكررة حال الغلق عند الفولطية(V_{DRM}).

I_{RRM} : ذروة التيار العكسي المتكررة حال الغلق عند الفولطية (V_{RRM}) .

V_{TM} : ذروة الفولطية في حال الفتح (on-state) عند درجة حرارة الغلاف.

V_{GT} : فولطية قدح البوابة الـ(DC)(القيمة الصغرى عند درجة حرارة $(T_C = 25^o)$ والعظمى عند درجة حرارة $(T_C = 125^o)$.

I_{GM} : ذروة تيار البوابة.

P_{GM} : ذروة القدرة المبددة للبوابة

$P_{G(AV)}$: القيمة المتوسطة للقدرة المبددة للبوابة.

I_{TSM} : ذروة أول دورة لتيار القوس الأمامي

dv/dt : معدل تغير الفولطية الأمامية المطبقة الحرجة .

$I^2 t$: القيمة الفعالة لتيار القوس الكهربائي في حال الفتح ولفترة زمنية معينة من أجل اختيار القاطع.

di/dt : القيمة العظمى لمعدل الارتفاع في التيار الأمامي في حال الفتح.

t_{gt} : زمن الفتح المتحكم به لنبضة البوابة.

t_g or t_{off} : الوقت الذي يجب أن ينقضي بعد توقف التيار الأمامي المار خلال الثايرستور وقبل تطبيق الفولطية الأمامية مرة أخرى في حال الغلق.

٣-٤- قدح الثايروستور Thyristor Firing

طرق تحويل الثايروستور من حالة الفصل إلى حالة الوصل (Thyristor Turn-On)، حيث يتم تحويل الثايروستور إلى حالة الوصل بزيادة تيار المصعد (Anode Current) ويتم تحقيق ذلك بإحدى الطرق التالية :-

١- حراريا:- إذا كانت درجة حرارة الثايروستور مرتفعة فإن ذلك سوف يؤدي إلى وجود عدد كبير من الإلكترونات الحرة مما يؤدي إلى زيادة تيار التسرب مؤدياً إلى تحويل الثايروستور إلى حالة الوصل.

٢- بإستخدام الضوء:- إذا تم تسليط ضوء معين على وصلة الثايروستور فإن ذلك سوف يؤدي إلى زيادة عدد الإلكترونات الحرة وزيادة تيار التسرب مما يؤدي إلى تحويل الثايروستور إلى حالة الوصل.

٣- عن طريق تطبيق جهد مرتفع:- إذا كان جهد الانحياز الأمامي بين المصعد والمهبط اكبر من جهد الانهيار الأمامي (V_{BO})، فإن ذلك سوف يؤدي إلى مرور تيار تسربي كبير مما يؤدي إلى تحويل الثايروستور إلى حالة الوصل .

٤- بواسطة تيار البوابة:- بتطبيق جهد على بوابة الثايروستور يؤدي إلى مرور تيار وزيادة هذا التيار يؤدي إلى تحويل الثايروستور إلى حالة الوصل.

وتستخدم طريقة التحكم في البوابة بشكل واسع في قدح الثايروستور أي تحويله من حالة القطع إلى حالة الوصل لأنها أكثر الطرق فعالية وأكثرها سهولة في التطبيق. ولابد من أخذ الأمور التالية بعين الاعتبار عند تصميم دوائر قدح الثايروستورات:-

١- تطبيق جهد بين البوابة والمهبط من أجل تحويل الثايروستور إلى حالة الوصل عندما يكون الثايروستور منحازاً انحيازاً أمامياً.

٢- يجب إزالة إشارة البوابة عندما يتحول الثايروستور إلى حالة الوصل.

٣- لا تطبق هذه الإشارة عندما يكون الثايروستور منحازاً أنحيازاً عكسياً.

٤-عندما يكون الثايروستور في حالة القطع فإنه بتطبيق جهد سالب بين البوابة والمهبط سوف يؤدي إلى تحسين خواص الثايروستور. وبالتالي تحتاج إلى جهد

موجب كبير للتغلب على هذا الجهد السالب من أجل تحويل الثايروستور إلى حالة الوصل.

يقدح الثايروستور عن طريق التحكم بالبوابة بعدة طرق نذكر منها:-

١- القدح بإشارة تيار مباشر (Trigger By Dc Gate-Signal):-

يتم ذلك بتطبيق إشارة جهد بقيمة وقطبية مناسبة بين البوابة والمهبط من أجل قدح الثايروستور. وفي هذه الحالة تكون الإشارة المطبقة مستمرة من اجل تامين استمرار تيار البوابة ولا توجد دائرة عزل للبوابة عن دائرة جهد التيار المباشر.

٢- القدح بتطبيق جهد متناوب على بوابة الثايروستور:-

(Triggering By Ac Gate Signal)

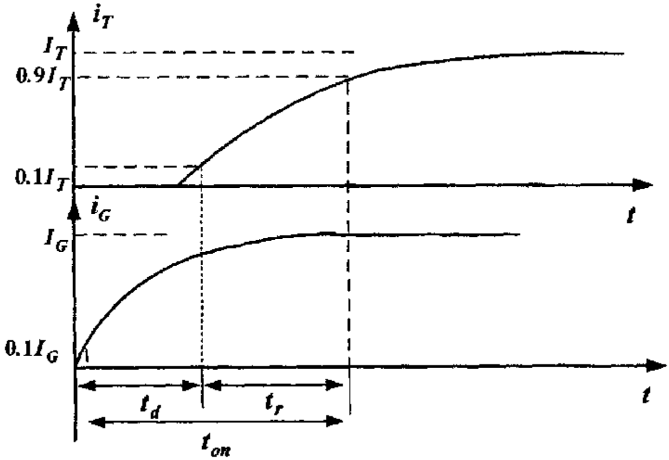
يتم في هذه الطريقة بتطبيق جهد متناوب بين البوابة والمهبط. ومن أهم ميزات هذه الطريقة هي الحصول على عزل مناسب بين دائرة القدرة ودائرة التحكم. ويمكن الحصول على زاوية القدح للثايروستور بواسطة تغيير زاوية فرق الطور لإشارة التحكم. التحكم في البوابة يتم خلال النصف الموجب للموجة بعد قدح الثايروستور وخلال النصف السالب للموجة فانه يتم تطبيق جهد عكسي بين البوابة والمهبط.

٣- القدح باستخدام النبضات (Triggering By Pulse-Gate Signal):-

في هذه الحالة يتم التحكم بالبوابة عن طريق إشارة نبضية أو تتابع لإشارات ذات ترددات مرتفعة. ويستخدم محول نبضات كعازل ويكون الفقد في هذه الحالة قليلا لان التحكم لا يكون بشكل مستمر.

عند استخدام دوائر تحكم جهد متناوب (Ac Circuits) يتم التحكم بزمن القدح للثايروستور. ويكون ذلك بواسطة تغير زاوية فرق الطور للجهد المتناوب

المطبق على البوابة. أو باستخدام حزمة من النبضات بزمن مناسب من خلال دائرة تحكم نبضية. والشكل (٣-٢٠) يبين شكل موجة تيار المصعد للعنصر عند التحكم بالبوابة. هنالك زمن تأخير (t_{on}) $(Turn-on-Time)$ بين تطبيق إشارة البوابة وتوصيل الثايروستور. ويعرف هذا الزمن بأنة الفترة الزمنية بين (10%) من تيار البوابة في الحالة الثابتة $(0.1\,I_G)$ و (90%) من قيمة تيار الحالة الثابتة للثايروستور في حالة التوصيل $(0.9\,I_T)$. وهو عبارة عن مجموع زمن التأخير (t_d) وزمن الارتفاع (t_r). ويحدد زمن التأخير t_d $((Delay-Time)$ بالزمن بين (10%) من تيار القاعدة إلى (10%) من تيار الثايروستور $(0.1\,I_T)$. و (t_r) هو الزمن اللازم لارتفاع تيار المصعد من (10%) إلى (90%) في حالة التوصيل عند الحالة الثابتة.



الشكل (٣-٢٠)

شكل موجة تيار المصعد للعنصر عند التحكم بالبوابة

ويجب أخذ النقاط التالية بعين الاعتبار عند تصميم دائرة التحكم بالبوابة باستخدام النبضات:-

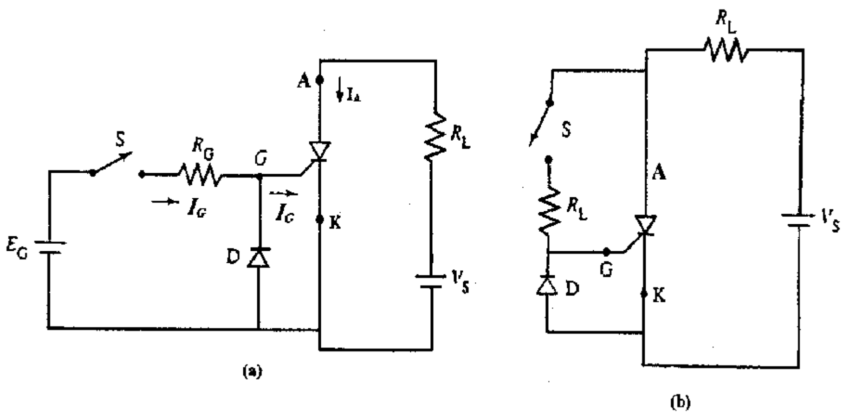
١- يجب فصل دائرة التحكم عن الثايروستور عندما يتم قدح الثايروستور لان استمرار توصيل هذه الدائرة يؤدي إلى زيادة الضياعات في وصلة البوابة.

٢- يجب عدم تطبيق إشارة على بوابة الثايروستور في حالة الانحياز العكسي لأن ذلك يؤدي إلى زيادة تيار التسرب.

٣- عرض النبضة المطبق على البوابة (t_G) يجب أن يكون أكبر من الزمن اللازم لوصول قيمة تيار المصعد إلى تيار الإمساك (Holding Current)، أي يجب أن يكون $(t_G > t_{on})$.

الدوائر المستخدمة في قدح الثايروستور(Types Of Thyristor Firing Circuits):-

١- قدح الثايروستور باستخدام التيار المباشر (Dc Firing Signals):- يبين الشكل (٣-٢١) الدائرة المستخدمة لهذا الغرض.



الشكل (٣-٢١)

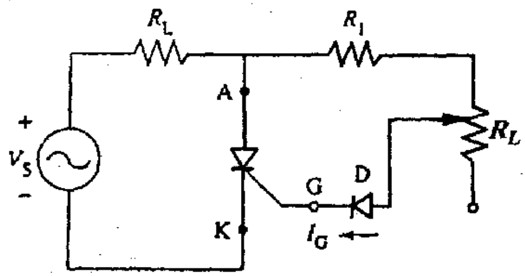
a) مصدرين مختلفين b) من نفس المصدر

دائرة قدح الثايروستور باستخدام التيار المباشر

يتم بواسطة هذه الدائرة الحصول على تيار البوابة للثايروستور (SCR) من منبع التغذية المستمر وعند غلق المفتاح (S)، يزداد تيار البوابة الناتج عن مصدر الجهد (V_{dc}). وبالتالي يتحول الثايروستور إلى حالة الوصل وعندها يهبط جهد المصعد إلى قيمة صغيرة ويتناقص تيار البوابة إلى قيمة صغيرة. وتستخدم المقاومة (R) للتقليل من تيار البوابة. والديود في هذه الدائرة يمنع تطبيق جهد عكسي على وصلة البوابة- المهبط.

٢- قدح الثايروستور بواسطة التيار المتناوب (Ac Firing Signals):-

في دوائر القدح بواسطة التيار المتردد يتم الحصول جهد البوابة- المهبط بواسطة الإزاحة الطورية للجهد المتردد والذي يكون جزء من المصدر الأساسي. حيث يتم تامين عزل مناسب بين الجهد الرئيسي ودوائر التحكم. والطريقة البسيطة للحصول على زاوية قدح حتى $(\alpha = 90^{\circ})$ مبينة في الشكل (٣-٢٢).



الشكل (٣-٢٢)

دائرة قدح الثايروستور بواسطة التيار المتناوب

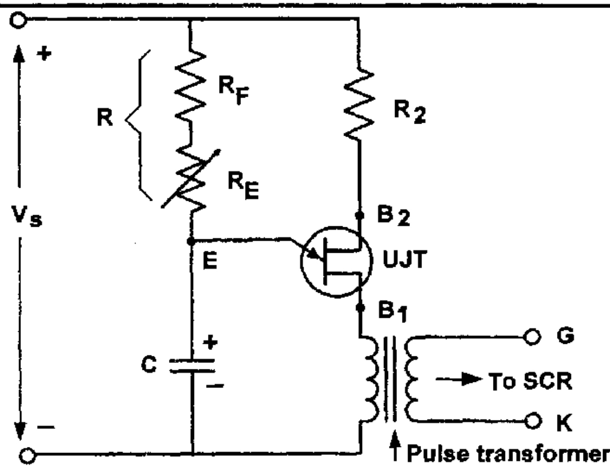
تغير قيمة المقاومة (R) يعني زيادة في زمن التأخير (Delay Time) عندما يكون الجهد موجبا بشكل كافي لتامين جهد البوابة اللازم لفتح الثايروستور.

٣- قدح الثايروستور باستخدام النبضات (Pulse Firing Signals):-

لهذه الطريقة مزايا كثيرة عند قدح الثايروستور، حيث أنها تقلل من الضياعات في القدرة وتمكن من التحكم الدقيق في عمل الثايروستور. ومن السهل في هذه الطريقة الحصول على دائرة عزل بين الثايروستور ودائرة القدح. إن استخدام محول نبضات أو ديود ضوئي ضروري في حال قدح عدد من الثايروستورات من نفس المصدر. وللتعرف على هذا النوع من الدوائر فإنه يتم تقسيمها إلى نوعين أساسيين:-

أ- الدوائر التي تستخدم الترانزيستور وحيد الوصلة (UJT) كما هو مبين في الشكل (٣-٢٣). وهي من الطرق العملية المستخدمة في قدح الثايروستور، حيث أنها تؤمن عدة نبضات بمجال ترددي ضيق عند النقطة (B_1). وعندما يتم شحن المكثف إلى الجهد (V_p) للترانزيستور (UJT) فإن هذا الترانزيستور يتحول إلى حالة التوصيل مما يؤدي إلى وجود مقاومة منخفضة لوصلة الباعث – قاعدة. ويمر تيار الباعث خلال الملف الابتدائي لمحول النبضات موصلا بذلك نبضة إلى بوابة الثايروستور.

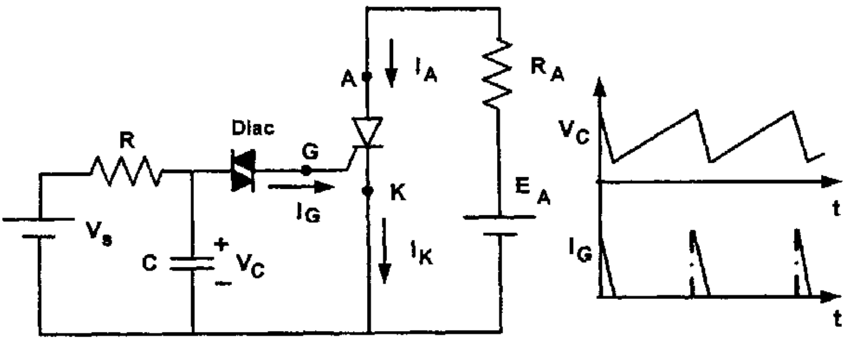
ويمكن زيادة عرض نبضة الخرج من المحول بزيادة قيمة المكثف. ومن المشاكل في استخدام هذه الطريقة أنه نتيجة للمجال الترددي الضيق للنبضة قد لا يتم الوصول إلى تيار الإمساك قبل إزالة إشارة النبضة. ولذلك تضاف دائرة $(RC \quad Snubber)$ من اجل التخلص من هذه المشكلة.



الشكل (٣-٢٣)

دائرة تستخدم ترانزيستور وحيد الوصلة (UJT)

ب- الدوائر التي تستخدم الدياك:- والشكل (٣-٢٤) يبين الدائرة المستخدمة لهــذه الغاية.

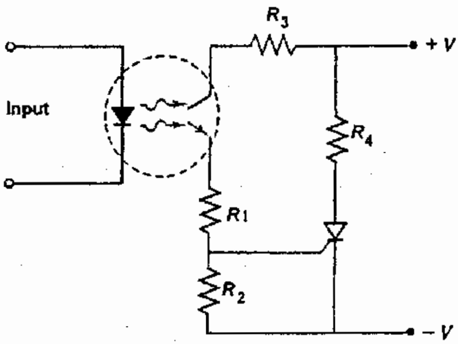


شكل (٣-٢٤)

دائرة تستخدم الدياك

يشحن المكثف ببطء خلال فترة زمنية تحدد بواسطة الثابت الزمني لـ(RC)، وعندما يتم شحن هذا المكثف إلى جهد اكبر من جهد الانهيار للترياك، فإن الترياك يتحول إلى حالة التوصيل فيتم في هذه الحالة تفريغ شحنة المكثف عبر بوابة الثايروستور. وبعد فترة بسيطة يتحول الدياك إلى حالة القطع وتتكرر العملية.

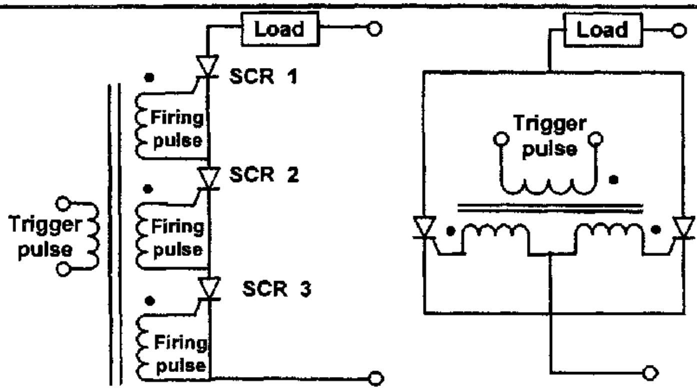
ج-الدوائر التي تستخدم الديود الضوئي (Optocoupler):- الشكل (٣-٢٥) يبين الدائرة المستخدمة لهذه الغاية.



الشكل (٣-٢٥)

دائرة تستخدم الديود الضوئي

ويمكن أن يتم قدح عدد من الثايروستورات موصولة مع بعضها على التوالي أو التوازي كما هو مبين في الشكل (٣-٢٦).



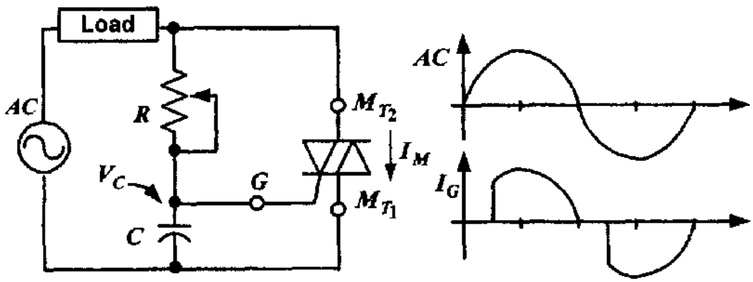
الشكل (٣-٢٦)

دوائر لقدح عدد من الثايروستورات في حالتي التوالي والتوازي

٣-٤-١- حساب فترات التوصيل و التأخير

Calculation of Delay and Conduction periods

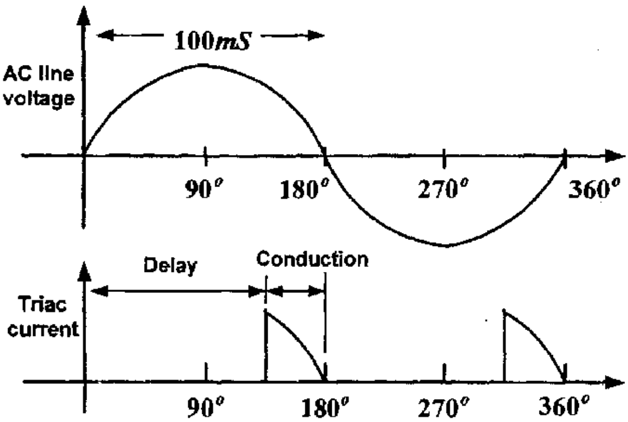
كما نشاهد في دائرة التحكم الطورية في الشكل(٣-٢٧)، فإن استخدام الترياك أو الثايرستور سوف يعمل على تنظيم القدرة إلى الحمل من خلال فترات التوصيل للزمن الدوري للموجة.



الشكل (٣-٢٧)

تنظيم القدرة إلى الحمل باستخدام الترياك

وكما يظهر في الشكل (٣-٢٨)، فإن لكل زمن نصف دوري نجد أن الثايرستور (SCR) أو الترياك يعملان على تأخير التوصيل ومن ثم التوصيل.



الشكل (٣-٢٨)

أن قياسات التأخير (Delay) أو التوصيل (Conduction) غالباً ما يعبر عنها بوحدات الزمن أو الزاوية (Angle) ومن الضروري معرفة التحويل بين القياسين.

في الأردن فان القدرة المترددة لها تردد مقداره (50 Hz) لذا فان الزمن عند منتصف الموجة الجيبية يكون:-

$$0.5 \times \frac{1}{50(Hz)} = 10\ ms$$

ولذلك فإن:-

$$\textit{Delay time} + \textit{Conduction time} = 10\ ms$$

لنفرض على سبيل المثال أن المقوم السلكونى (SCR) له زمن توصيل $(3ms)$، فإن زمن التأخير يحسب:-

$$10\,ms - 3\,ms = 7\,ms$$

وعندما نتعامل مع الزوايا فإننا نقول أن الزاوية عند منتصف الموجة الجيبية يساوي (180^o) لذلك:-

$$Delay\ angle + Conduction\ angle = 180^o$$

لنفرض على سبيل المثال أذا زاوية التأخير للترياك تساوي (30^o) فان:-

$$Conduction\ angle = 180^o - 30^o = 150^o$$

للتحويل بين قياسات الزوايا والزمن يجب معرفة العلاقة بينهما. حيث لنظام بتردد $(50Hz)$، فإن الزمن عند منتصف الموجة الجيبية يساوي $(10\,ms)$ والزاوية (180^o) .لذلك:-

$$\frac{10\,ms}{180^o} = 55.56\ {}^{\mu s}\!/_{\deg}$$

لنفرض على سبيل المثال أذا كانت زاوية توصيل الترياك (120^o)، فإنه يمكن حساب فترة التوصيل:

$$55.56\,{}^{\mu s}\!/_{\deg} \times 120^o = 6.67\,ms$$

$$55.56\ \mu s = 1\deg$$

مثال (٣-٣):- نظام بتردد $(50\,\text{Hz})$، والتأخير لمقوم محكوم هو $(5\,ms)$ قبل أن يقدح. جد زمن التوصيل للمقوم المحكوم (SCR). ثم جد زاوية التوصيل للمقوم المحكوم (SCR).

الحل:-

لإيجاد زمن التوصيل نطبق المعادلة:-

$$Delay\ time + Conduction\ time = 10\ ms$$

بإعادة ترتيب المعادلة نحصل على:-

$$Conduction\ time = 10\ ms - 5\,ms = 5\,ms$$

لحساب زاوية التوصيل نستخدم معادلة التحويل من زمن التوصـيل إلـى زاويـة التوصيل:-

$$55.56\ \mu s = 1\deg$$

معامل التحويل يكون:-

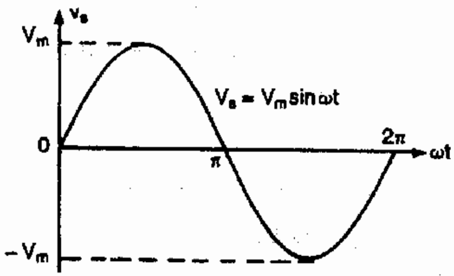
$$1\deg/55.56\ \mu s$$

نستخدم معامل التحويل لتحويل زمن التوصيل إلى زاوية التوصيل :

$$Conduction\ angle = 5\,ms \times \frac{1\deg}{55.56\mu s} \times \frac{1000\mu s}{1ms} = 90^o$$

٣-٥- إطفاء الثايروستور Thyristor Turn-off

عملية إطفاء الثايروستور يقصد بها تحويل الثايروستور من حالة الوصـل إلى حالة الفصل. ويتم ذلك بتقليل التيار الأمامي للثايروستور إلى قيمة أقل من تيار الإمساك $((I_H)\ \ Holding\ \ Current)$.



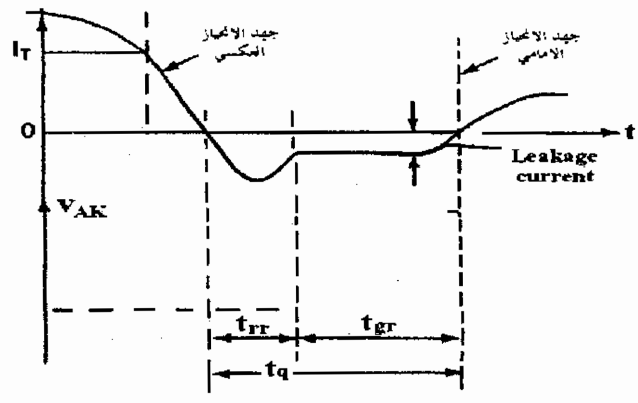
الشكل (٣-٢٩)

مرور الجهد المطبق بنقاط الصفر في موجة القدح

حسب الطريقة المستخدمة في عملية القدح فانه يتم إطفـــاء الثايروســـتور.

وفي حالة استخدام جهد تيار متردد (Ac) مطبق على بوابة الثايروســـتور يمكـــن تحويل الثايروستور إلى حالة القطع عند مرور الجهد المطبق بنقاط الـــصفر فـــي موجة القدح، كما هو مبين في الشكل (٣-٢٩). أما في حالة استخدام جهد التيـــار المباشر (Dc) لقدح الثايروستور، فإنه يتم تحويل الثايروستور إلى حالـــة القطـــع باستخدام عناصر إضافية أو بتطبيق جهد عكسي بين المهبط والمصعد وجعل التيار في الثايروستور يصل إلى الصفر (Forced Turn-Off).

ويكون الزمن اللازم لعمليـــة الفـــصل (t_q) $(Turn-Off-Time)$ هـــو مجموع الزمن بين تطبيق الجهد العكسي (t_{rr}) وزمن عودة حاملات الشحنة إلـــى وضعها قبل عملية التوصيل (t_{gr}).



الشكل (٣-٣٠)

قيمة جهد الانحياز الأمامي والعكسي للثايروستور

يمكن القول بان زمن الفصل للثايروستور يعتمد على تيار المـصعد (I_T) وقيمة الجهد العكسي المطبق، وكذلك على قيمة جهد الانحياز الأمامي، كمـا هـو مبين في الشكل (٣-٣٠). ويتراوح هذا الزمن بحدود $(50-100\ \mu s)$ للثايروستور العادي، وبحدود $(10-20\ \mu s)$ للثايروستورات ذات الترددات العالية.

٣-٥-١- طرق التبديل للثايروستور

Thyristor Commutation Techniques

يتم تحويل الثايروستور من حالة القطع إلى حالة التوصيل بتطبيق نبـضة على بوابة الثايروستور. عندما يكون الثايروستور في حالة التوصيل فـان هبـوط الجهد علية يكون قليلا بحدود $(0.25 \rightarrow 2V)$. وعندما يتم قدح الثايروستور ويقوم بتوصيل القدرة إلى الحمل فانه من الضروري إطفاء هذا الثايروستور بعـد ذلـك. وإطفاء الثايروستور يعني إزالة شروط الانحياز الأمامي ووجود جهد موجب مطبق على المصعد لن يؤدي إلى مرور تيار بدون تطبيـق نبـضة علـى بوابـة هـذا الثايروستور.

التبديل (Commutation):- هي عملية تحويل الثايروستور من حالة التوصيل إلى حالة الفصل، وتؤدي في العادة إلى تحويل مسار التيار في الثايروستور إلى أجزاء أخرى في الدائرة. ودائرة التبديل تستخدم عناصـر إضـافية مـن اجـل إطفـاء الثايروستور. ونتيجة التطور في صناعة الثايروستور تم تطوير دوائـر التبـديل. والميزة الأساسية للتطوير هو تقليل عملية الإطفاء للثايرستور.

أنواع التبديل في الثايروستور:-

تقسم أنواع دوائر التبديل في الثايروستور إلى نوعين أساسيين:-

١- التبديل الطبيعي (Natural Commutation).

٢- التبديل ألقسري (Forced Commutation).

١- **التبديل الطبيعي**:- إذا كان جهد الدخل (جهد المصدر) هو جهد متناوب فإن التيار المار في الثايروستور سوف يمر بنقطة الصفر بشكل طبيعي ويظهر جهد الانحياز العكسي على طرفي الثايروستور. وبالتالي يتم إطفاءه الثايروستور نتيجة التحويل الطبيعي لجهد المصدر، وهو ما يسمى بالتبديل الطبيعي. وهذا النوع من التبديل يستخدم في متحكمات الجهد المتناوب (Ac Voltage Controllers) والمقومات المحكومة عن طريق التحكم بزاوية القدح (Phase-controlled Rectifiers) والمحولات الدوارة (Cycle converters) .

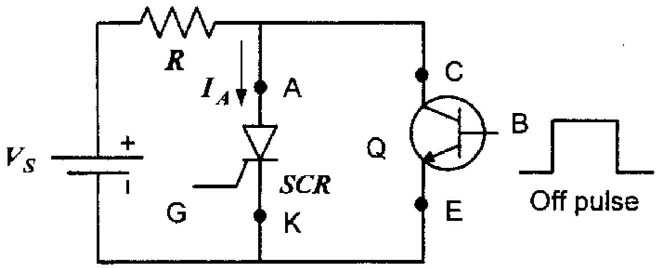
٢- **التبديل ألقسري**:- في بعض الدوائر الإلكترونية يكون جهد المصدر المطبق هو جهد مباشر. وفي هذه الحالة يتم إطفاء الثايروستور باستخدام دوائر إضافية. ومجال استخدامها في المقطعات (Choppers) والعاكسات (Inverters).

ويعتمد تصنيف دوائر التبديل ألقسري على العناصر المستخدمة في الدائرة وعلى الطريقة التي تؤدي إلى جعل التيار المار من خلال الثايروستور مساويا إلى الصفر. وتتألف دوائر التبديل في العادة من مكثف وملف ومن عدد من الثايروستورات ومن عدد من الديودات.

ويمكن تصنيف دوائر التبديل ألقسري إلى الدوائر الأساسية التالية:-

١- التبديل باستخدام الترانزيستور كمفتاح (Transistor Switch Commutation):-

والدائرة المستخدمة لهذه الغاية مبينة في الشكل (٣-٣١).



الشكل (٣-٣١)

التبديل باستخدام الترانزيستور كمفتاح

حيث يتم استخدام ترانزيستور (Q) كمفتاح، عندما يكون الثايروستور في حالة التوصيل فإن الترانزيستور يكون في حالة الفصل. ومن أجل إطفاء الثايروستور تطبق نبضة موجبة إلى قاعدة الترانزيستور مما يؤدي إلى تحويله إلى حالة التوصيل مما يؤدي إلى جعل تيار المصعد للثايروستور يمر من خلال الترانزيستور، وعندما يصل تيار المصعد للثايروستور إلى قيمة اقل من تيار الإمساك فانه يتم إطفاء الثايروستور، ويستمر الترانزيستور في التوصيل لفترة زمنية تكفي لإطفاء الثايروستور.

٢- التبديل باستخدام المكثف (Capacitor Commutation):- الشكل (٣-٣٢) يبين الدائرة المستخدمة لهذه الغاية. عندما يكون الثايروستور (SCR_1) في حالة التوصيل فانه يتم شحن المكثف بجهد يصل إلى جهد المصدر (V_S) عبر المقاومة (R_L). ويكون الثايروستور (SCR_2) في حالة الفصل. من اجل إطفاء (SCR_1) يتم قدح (SCR_2) وعندما يوصل (SCR_2) فان المكثف يفرغ شحنته خلال (SCR_1) مؤديا إلى تطبيق جهد عكسي علية. وعندما يصل تيار تفريغ المكثف إلى الصفر فان الثايروستور (SCR_1) يطفأ.

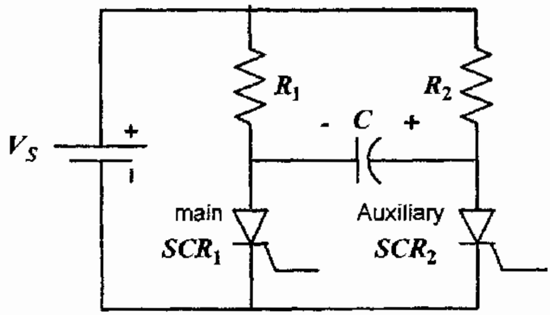
ومن اجل التأكد من نجاح عملية الإطفاء فانه يجب تحديد قيمة المكثف (C) وهذه القيمة تحدد من العلاقة التالية :-

$$C \geq \frac{T_{\text{off}}}{0.693 R_L}$$

حيث أن :- C سعة المكثف (μF) .

- R_L مقاومة الحمل (Ω).

- T_{off} زمن الإطفاء (μS).



الشكل (٣-٣٢)

التبديل باستخدام المكثف

مثال (٣-٤):- من اجل دائرة إطفاء للثايرستور باستخدام المكثف إذا كانت مقاومة الحمل تساوي $(R_L = 10\Omega)$ و $(T_{off} = 10\mu S)$ أوجد القيم الصغرى لسعة المكثف من اجل تأكيد نجاح عملية الإطفاء للثايروستور .

الحل:- القيمة الصغرى لسعة المكثف تعطى بالعلاقة:-

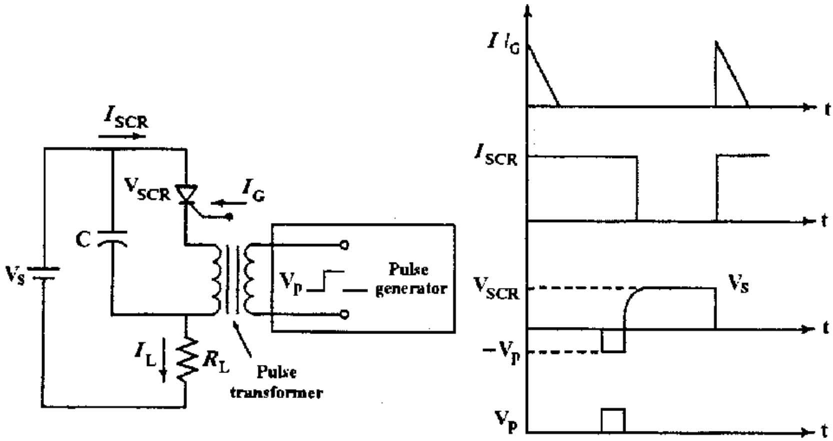
$$C = \frac{T_{\text{off}}}{0.693 R_L} = \frac{10 \times 10^{-6}}{0.693 \times 10} = 1.44 \mu F$$

ويختار مكثف سعته تساوي :- $C = 1.5 \mu F$

٤- تبديل نبضي باستخدام مصدر خارجي:-

Impulse – Commutation by External Source :-

يبين الشكل (٣-٣٣) الدائرة لهذا النوع من دوائر التبديل، عندما يتم قدح الثايروستور بتطبيق نبضة على بوابته فان التيار يمر من خلال هذا الثايروستور وخلال الملف الثانوي لمحول النبضات والى الحمل. من اجل إطفاء الثايروستور يتم تطبيق نبضة موجبة من محول النبضات على المهبط للثايروستور.

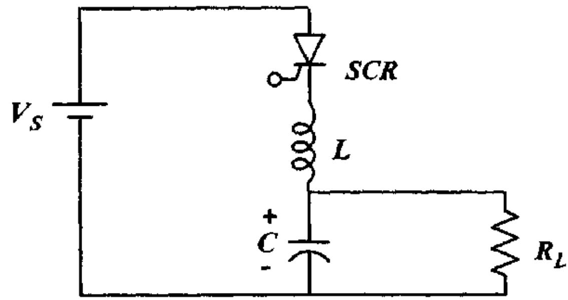


الشكل (٣-٣٣)

تبديل نبضي باستخدام مصدر خارجي

٤- تبديل نبضة رنانة (Resonant Pulse Commutation):- وهي دوائر تستخدم الملف والمكثف لتشكل دوائر رنين، ويمكن أن توصل هذه الدوائر على التوالي أو التوازي مع الثايروستور.

أ- دوائر الرنين الموصولة على التوالي مع الثايروستور:-

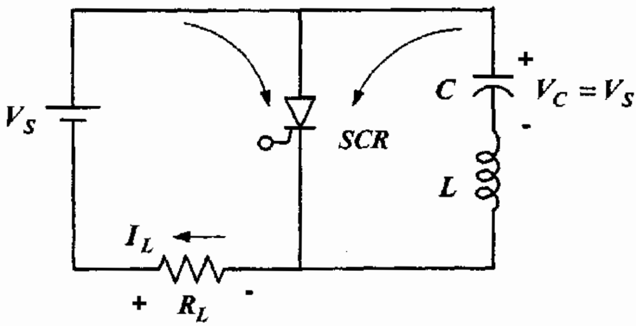


الشكل (٣-٣٤)
دائرة رنين موصولة على التوالي مع الثايروستور

الشكل (٣-٣٤) يبين الدائرة الكهربائية لهذا النوع من دوائر التبديل دائرة الرنين المكونة من الملف والمكثف (LC) تؤدي إلى تطبيق جهد عكسي على الثايروستور من اجل إطفاءه.

ب- دوائر الرنين الموصولة على التوازي مع الثايروستور:-

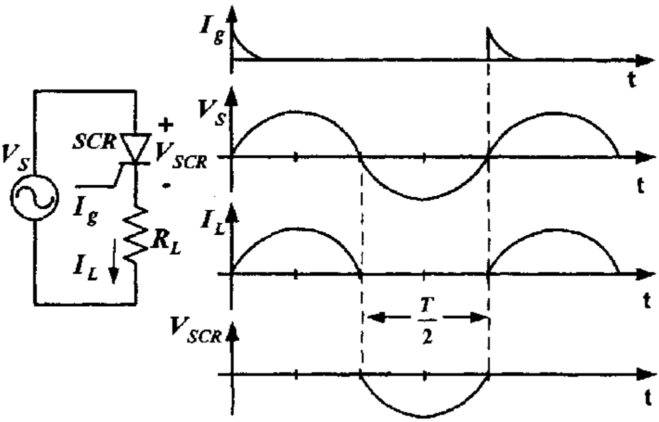
الشكل (٣-٣٥) يبين الدائرة الكهربائية لهذا النوع من دوائر التبديل في هذه الحالة يتم شحن المكثف خلال فترة الفصل للثايروستور بجهد مساويا إلى جهد المصدر، وعندما يتم توصيل الثايروستور فان المكثف يقوم بتفريغ شحنته من خلال دائرة الرنين مما يؤدي إلى تطبيق جهد عكسي على الثايروستور مما يؤدي إلى إطفاءه وتكرر هذه العملية خلال فصل وتوصيل الثايروستور.



الشكل (٣-٣٥)

دائرة رنين موصولة على التوازي مع الثايروستور

٥- تبديل الخط (AC Line Commutation):- تستخدم هذه الطريقة في دوائر الجهد المتناوب، حيث يبين الشكل (٣-٣٦) الدائرة الكهربائية. يمر التيار لهذا النوع من دوائر التبديل في هذه الدائرة خلال النصف الموجب للموجة ويصبح الثايروستور بانحياز عكسي خلال النصف السالب من الموجة. عندما يصبح جهد بوابة الثايروستور مساويا إلى الصفر فان الثايروستور سوف يطفئ، فإذا كان زمن الإطفاء للثايروستور اقل من فترة التوصيل لنصف الموجة أي خلال الفترة $\left(\frac{T}{2}\right)$ فان التردد الأعظمي الذي سوف تعمل عنده هذه الدائرة يعتمد على زمن الفصل للثايروستور.



الشكل (٣-٣٦) تبديل الخط

٣-٥-٢- تصميم دوائر التبديل ألقسري

يتم تصميم هذه الدوائر من خلال إيجاد القيم المناسبة للملفات والمكثفات المستخدمة.

الخلاصة:- يمكن إطفاء الثايروستور من خلال دوائر التبديل الطبيعي بجعل قيمة تيار الثايروستور مساويا إلى الصفر عندما يمر جهد المصدر بقيم الصفر. وإطفاء الثايروستور بالتبديل ألقسري يتم من خلال جعل تيار الثايروستور يصل إلى الصفر بمساعدة دوائر تبديل قسري وفي هذه الدوائر إطفاء الثايروستور يعتمد على تيار الحمل. ومن اجل التأكد من إطفاء الثايروستور فان زمن الإطفاء للدائرة يجب أن يكون اكبر من زمن الإطفاء للثايروستور والذي يتم تحديده من قبل الشركة الصانعة.

٣-٦- تحديد صلاحية عناصر مجموعة الثايرستور:-

٣-٦-١- تحديد أطراف وصلاحية الثايرستور:-

يمكن تحديد أطراف الثايرستور الثلاثة باستخدام جهـاز قيـاس المقاومـة (الأوميتر)، وعند توصيل الطرف الموجب والسالب للأوميتر بأطراف الثايرستور المختلفة فإن قراءات القياس تكون كما هو مبين في الجدول (٣-١).

المقاومة	الطرف السالب للأوميتر	الطرف الموجب للأوميتر
عالية	المهبط	المصعد
عالية	البوابة	المصعد
عالية	المصعد	المهبط
عالية	البوابة	المهبط
عالية	المصعد	البوابة
منخفضة	المهبط	البوابة

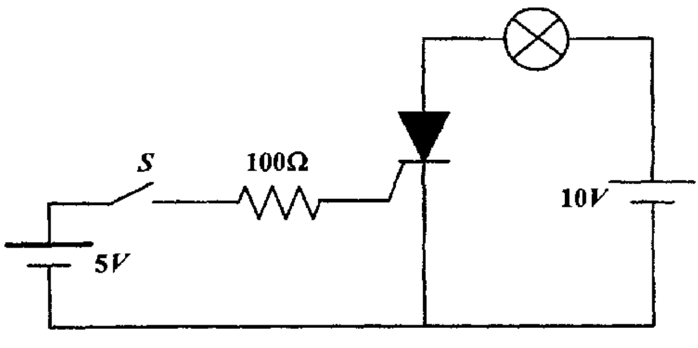
الجدول (٣-١)

توصل أطراف الأوميتر بين كل طرفين من الأطراف الثلاثة للثايرستور، ويجري تبديل الوصل بين هذه الأطراف حتى يتم الحصول على مقاومة صـغيرة فيكـون الطرف الموجب للبطارية موصولاً بالبوابة والطرف السالب لبطاريـة الأوميتـر موصولاً بالمهبط ويكون الطرف الثالث هو المصعد.

فحص الثايروستور:- قبل استخدام الثايروستور في أي دائرة لا بد من التأكد من صلاحيته وذلك بخلوة من الأعطال التالية:-

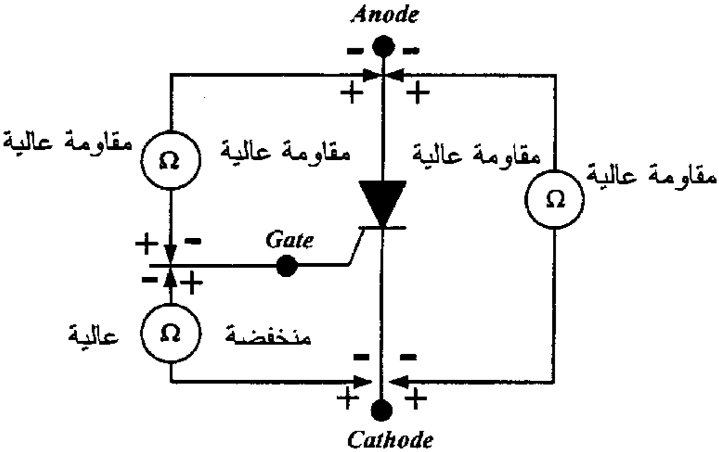
١- دارة القصر (Short Circuit):- ويتم ذلك بقياس المقاومة بين مصعد الثايرستور ومهبطة، فإذا كانت المقاومة مساوية الصفر تقريباً يكون الثايرستور معطوباً. أما أذا كانت المقاومة عالية جداً (بحدود الميغا أوم) فيدل ذلك على عدم وجود دارة قصر.

٢- دارة الفتح (Open circuit):- نستخدم الدائرة في الشكل (٣-٣٧) لهذه الغاية، فنعد غلق المفتاح (S) يؤدي ذلك إلى مرور تيار في البوابة وبالتالي قدح الثايرستور وهذا بدورة يجعل الثايرستور في حالة توصيل فيضيُ المصباح، وغير ذلك يعتبر الثايرستور معطوباً.



الشكل (٣-٣٧)
فحص دارة الفتح في الثايرستور

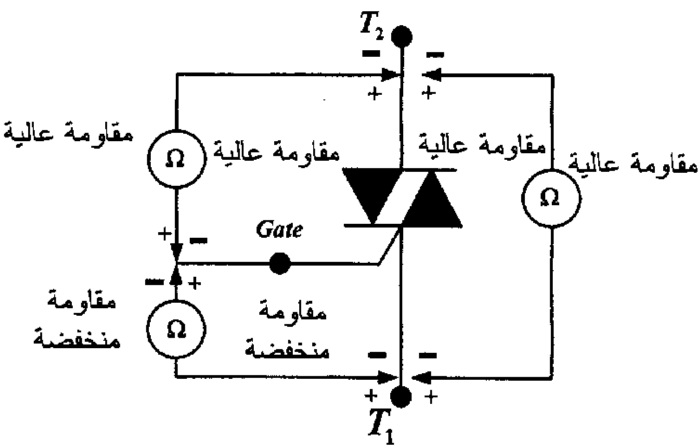
فحص الثايرستور بإستخدام الأوميتر كما هو مبين في الشكل (٣-٣٨).



الشكل (٣-٣٨) فحص الثايرستور بالأوميتر

٣-٦-٢- تحديد صلاحية الترياك

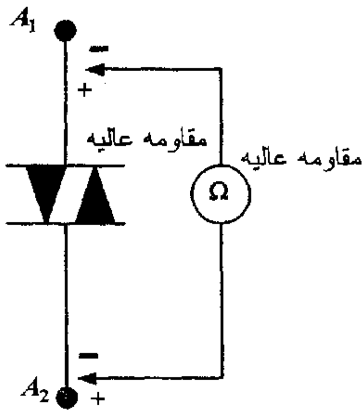
الشكل (٣-٣٩) يبين آلية تحديد صلاحية الترياك.



الشكل (٣-٣٩) تحديد صلاحية الترياك

٣-٦-٣- تحديد صلاحية الدياك

الشكل (٣-٤٠) يبين آلية تحديد صلاحية الدياك.



الشكل (٣-٤٠) تحديد صلاحية الدياك

الوحدة الرابعة

التقويم بإستخدام الثايرستور

الوحدة الرابعة

دوائر التقويم باستخدام الثايروستور

Rectifiers by Using Thyristor

في دوائر التقويم باستخدام الديودات يتم الحصول على جهد ثابت على المخرج. ومن اجل الحصول على جهد مخرج متحكم به يتم استخدام الثايروستور لهذه الغاية. ويتم التحكم بجهد المخرج باستخدام الثايروستور عن طريق التحكم بزاوية القدح لهذه الثايروستورات. يتم تحويل هذه الثايرويستورات الى حالة التوصيل بتطبيق نبضة قدح على بوابة هذه الثايروستورات ويتم تحويلها الى حالة القطع بالتبديل الطبيعي(Natural Commutation). وعند استخدام الأحمال الحثيه يتم تحويلها الى حالة الفصل بقدح ثايروستور آخر خلال النصف السالب من موجة جهد المدخل. ومن مميزات هذه المقومات أنها بسيطة وقليلة التكاليف وفعالية هذه المقومات في العادة اكبر من (95%). وهذه المقومات تقوم بالتحويل من $(Ac \rightarrow Dc)$ وتستخدم بشكل واسع في التطبيقات الصناعية وخصوصاً التحكم بسرعة المحركات.

يمكن تصنيف هذه المقومات الى نوعين أساسيين اعتماداً على مصدر التغذية:-

١- المقومات أحادية الطور (Single- phase Converters).

٢- المقومات ثلاثية الطور (Three- phase Converter).

وكل نوع من المقومات السابقة يمكن تقسيمه الى عدة أقسام هي:-

١- مقوم محكوم نصف موجة (Half-Wave Converter) :- هو مقوم يعمل ضمن ربع واحد وله قطبيه واحدة لجهد وتيار المخرج.

٢- مقوم محكوم جزئي (نصفي) (Semi converter):- هو مقوم يعمل ضمن ربع واحد وله قطبيه واحدة لجهد وتيار المخرج.

٣- مقوم محكوم موجة كاملة (Full-Wave Converter):- هو مقوم يعمل ضمن ربعين وقطبية جهد المخرج يمكن أن تكون موجبة او سالبة بينما تيار المخرج له قطبيه واحدة فقط.

٤- مقوم محكوم مضاعف (Dual converter):- مقوم يمكن أن يعمل في أربعة أرباع ويكون كلا من جهد وتيار المخرج موجباً او سالبا.

في بعض التطبيقات يمكن وصل هذه المقومات المحكومة مع بعضها على التوالي من أجل العمل عند جهود مرتفعة ومن أجل تحسين معامل القدرة للمدخل. يستخدم تحليل فورير كما هو الحال عند استخدام الديودات مع الأحمال المكونة من دوائر الملفات مع المقاومات.

عند إستخدام حمل حثي لهذه الدوائر يعتبر الحمل ذو قيمة كبيرة من اجل ضمان استمرار سريان التيار في الحمل.

٤-١- دوائر التقويم المحكوم أحادي الطور باستخدام الثايروستور:-

Single Phase Rectifiers by Using Thyristor

٤-١-١- دوائر التقويم المحكوم أحادي الطور نصف موجة:-

Single-Phase Half-Wave Control Rectifier

في هذا النوع من الدوائر يتم استخدام الثايرستور بدلاً من الديود، ويتم افتراض أن الجهد المتناوب المغذي لهذه الدوائر هو مصدر جهد مثالي (Ideal). سنقوم بتحليل هذه الدوائر بالطرق المستخدمة سابقاً في دوائر التقويم غير المحكوم (باستخدام الديود) مع الأخذ بعين الاعتبار أن الزاوية (α) في هذه الدوائر سيكون

لها قيم مختلفة غير الصفر. وكذلك مناقشة هذه الدوائر حسب طبيعة الحمل ومصدر التغذية.

٤-١-١-١- دوائر التقويم المحكوم أحادي الطور نصف موجة بحمل مادي:-
Single-Phase Half-Wave Controlled Rectifiers with resistive load circuit.

من أجل الحمل المادي فإن:-

$$Z = R \qquad , \qquad \phi = 0$$

وتكون قيمة:-

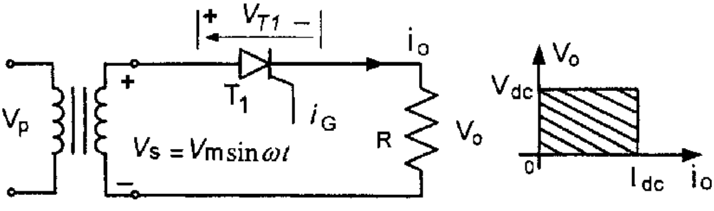
$$i_F = \frac{V_m}{R} Sin\omega t \qquad , \quad i_N = 0$$

وبالتالي فإن التيار الكلي يساوي:-

$$i = i_F + i_N = \frac{V_m}{R} Sin\omega t \tag{4.1}$$

مبدأ عمل المقوم المحكوم:-

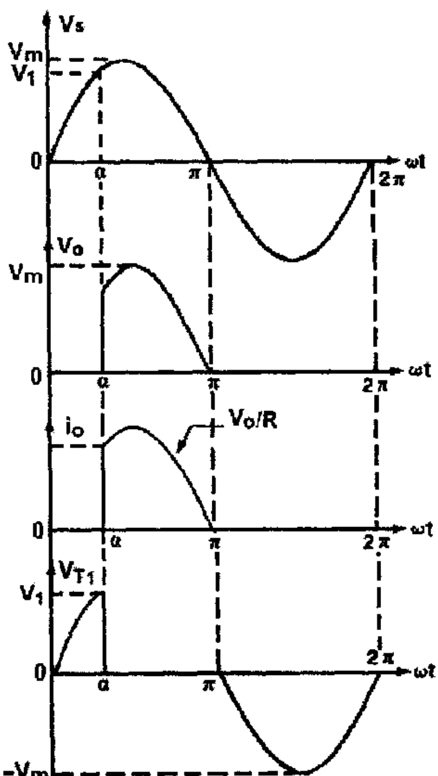
لفهم مبدأ عمل المقوم المحكوم نأخذ الدائرة المبينة في الشكل (٤-١) على اعتبار أن الحمل هو حمل مادي بحت. والشكل (٤-٢) يبين شكل موجة الدخل وموجة الخرج لهذا المقوم المحكوم وتيار الحمل والجهد على المقوم المحكوم.



شكل (٤-١)

دائرة مقوم محكوم نصف موجة بحمل مادي

خلال النصف الموجب من موجة الدخل يكون مصعد الثايرويستور (T_1) موجباً بالنسبة للمهبط أي أن الثايروستور يكون منحازاً انحيازاً أماميا. وعندما يتم قدح الثايروستور (T_1) بزاوية قدح $(\alpha = \omega t)$ فان الثايروستور يتحول الى حالة التوصيل ويتم ظهور الجهد المطبق على المدخل على مخرج الدائرة (الحمل). وعندما يبدأ الجهد المطبق على مدخل الدائرة بالنصف السالب للموجة عند زمن $(\omega t = \pi)$ يكون مصعد الثايروستور سالبا بالنسبة للمهبط ويكون الثايروستور في هذه الحالة منحازاً انحيازاً عكسياً ويتم تحويله الى حالة القطع.



الشكل (٤-٢) شكل الإشارة الداخلة والخارجة لمقوم محكوم نصف موجة بحمل مادي

التأخير في الزمن من لحظة تطبيق الجزء الموجب للموجة حتى قدح الثايروستور عند $(\alpha = \omega t)$ يدعى بالتأخير او زاوية القدح للثايروستور (Firing Angle)، في هذه الحالة فان منطقة العمل للثايرستور تكون ضمن الربع الأول، حيث أن الجهد والتيار للمقوم في الربع الأول. هذا النوع من المقومات المحكومة لا يستخدم بشكل واسع في الصناعة لان له معامل تموج مرتفع وتردد تموج منخفض. إذا اعتبرنا أن تردد مصدر التغذية (f_S) فيكون أقل تردد لجهد المخرج هو (f_S). وعلى اعتبار أن (V_m) هي القيمة العظمى لجهد المدخل فان القيمة المتوسطة لجهد المخرج (V_{dc}) يمكن الحصول عليها من العلاقة:-

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_m \, Sin\, \omega t \, d(\omega t)$$

$$= \frac{V_m}{2\pi}\left[-Cos\, \omega t\right]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_m}{2\pi}\left[1 + Cos\, \alpha\right] \qquad (4.2)$$

وبالتالي فان الجهد (V_{dc}) يمكن تغييره من $\left(\frac{V_m}{\pi}\right)$ الى الصفر بتغير قيمة (α) من (0) الى (π). ويكون له قيمة عظمى عندما تكون $(\alpha = 0)$ وتساوي $\left(V_{dm} = \frac{V_m}{\pi}\right)$.

والجهد الاسمي (Normalized voltage) (V_n) هو نسبة القيمة المتوسطة للجهد الى القيمة العظمى للقيمة المتوسطة للجهد:-

$$V_n = \frac{V_{dc}}{V_{dm}} = 0.5(1 + Cos\, \alpha) \qquad (4.3)$$

حيث أن (V_m) تمثل القيمة العظمى للجهد وتساوي:-

$$V_m = \sqrt{2}\, V_S$$

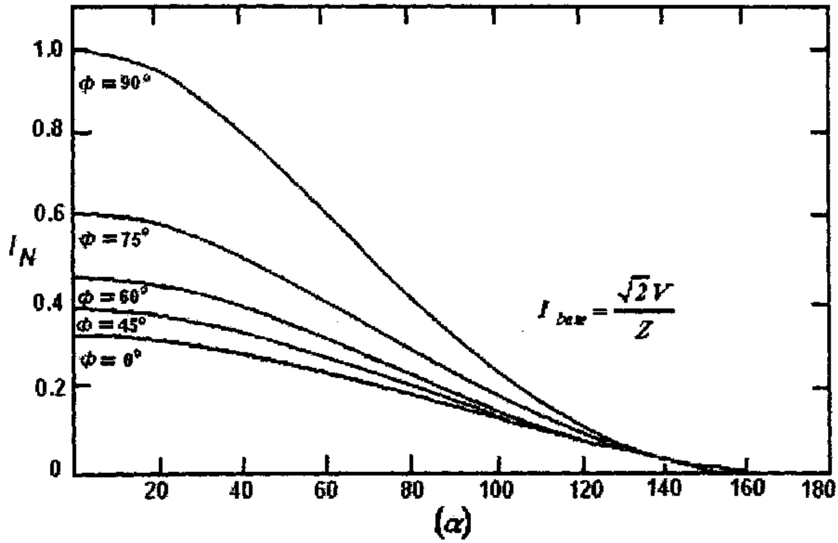
حيث أن (V_S) تمثل القيمة الفعالة لجهد المصدر.

وتعطى القيمة المتوسطة للتيار المار من خلال الحمل حسب العلاقة:-

$$I_{ave} = \frac{V_{ave}}{R} = \frac{V_m}{2\pi R}(1 + Cos\alpha) = \frac{I_m}{2\pi}(1 + Cos\alpha) \qquad (4.4)$$

وبالتالي فإن:-

$$I_N = \frac{I_{ave}}{I_m} = \frac{1 + Cos\alpha}{2\pi} \qquad (4.5)$$



الشكل (٤-٣)

العلاقة التي تربط بين (I_N) والزاوية (α)

والعلاقة التي تربط بين (I_N) والزاوية (α) مبينة في الشكل (٤-٣) من أجل قيم مختلفة لـ(ϕ).

والقيمة الفعالة للجهد على طرفي الحمل تعطى بالعلاقة:-

$$V_R = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \; Sin^2 \omega t \; d(\omega t)} = \sqrt{\frac{V_m^2}{4\pi}\int_{\alpha}^{\pi}(1 - Cos 2\omega \; t) \; d(\omega t)}$$

$$= \frac{V_m}{2}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left[\pi - \alpha + \frac{Sin 2\alpha}{2}\right]} = \frac{V_m}{2}\sqrt{\left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{Sin 2\alpha}{2\pi}\right]} \qquad (4.6)$$

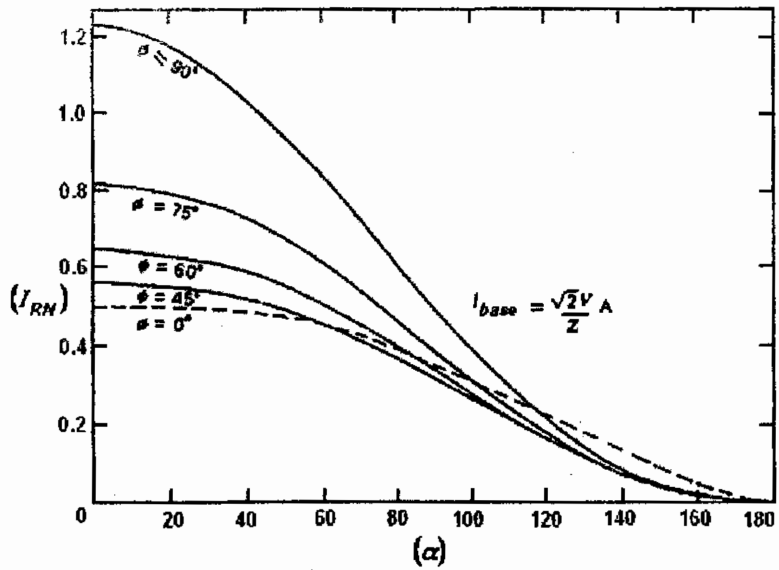
وبالتالي فإن القيمة الفعالة للتيار المار من خلال الحمل تعطى بالعلاقة:-

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_m}{2R}\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{Sin 2\alpha}{2\pi}} = \frac{I_m}{2}\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{Sin 2\alpha}{2\pi}} \qquad (4.7)$$

وتعطى القيمة (I_{RN}) بالعلاقة:-

$$I_{RN} = \frac{I_R}{I_m} = \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{Sin 2\alpha}{2\pi}} \qquad (4.8)$$

والعلاقة التي تربط (I_{RN}) مع (α) مبينة في الشكل (٤-٤) عندما تكون $(\phi = 0)$.



الشكل (٤-٤) العلاقة التي تربط (I_{RN}) مع (α)

مثال (٤-١):- دائرة تقويم محكوم أحادي الطور تغذي من مصدر جهد قيمته $(120V)$. إذا كان الحمل لهذا المقوم مادي $(R = 10\Omega)$، أحسب القيمة المتوسطة لجهد الحمل والقدرة المزودة للحمل من أجل قيم (α) التالية:-

$$\alpha = 0^o \;\;, \alpha = 45^o \;\;, \alpha = 90^o \;\;, \alpha = 135^o \;\;, \alpha = 180^o$$

١- من أجل (α) تساوي الصفر:-

القيمة العظمى للجهد تساوي:-

$$V_m = \sqrt{2}\; V_S = \sqrt{2} \times 120 = 170V$$

القيمة المتوسطة للجهد تساوي:-

$$V_{ave} = \frac{V_m}{2\pi}\left[1 + Cos\,\alpha\right] = \frac{170}{2\pi}\left[1 + Cos\,0\right] = 54V$$

القدرة المزودة للحمل تساوي:-

$$P_L = \frac{V_{ave}^2}{R} = \frac{(54)^2}{10} = 293 \text{ Watt}$$

٢- من أجل $(\alpha = 45^o)$:-

$$V_{ave} = \frac{V_m}{2\pi}\left[1 + Cos\,\alpha\right] = \frac{170}{2\pi}\left[1 + Cos\,45^o\right] = 46.2V$$

$$P_L = \frac{V_{ave}^2}{R} = \frac{(46.2)^2}{10} = 213 \text{ Watt}$$

٣- من أجل $(\alpha = 90^o)$:-

$$V_{ave} = \frac{V_m}{2\pi}\left[1 + Cos\,\alpha\right] = \frac{170}{2\pi}\left[1 + Cos\,90^o\right] = 27.1V$$

$$P_L = \frac{V_{ave}^2}{R} = \frac{(27.1)^2}{10} = 73.2 \text{ Watt}$$

- من أجل $(\alpha = 135^o)$:-

$$V_{ave} = \frac{V_m}{2\pi}\left[1 + Cos\,\alpha\right] = \frac{170}{2\pi}\left[1 + Cos\,135^o\right] = 7.92\;V$$

$$P_L = \frac{V_{ave}^2}{R} = \frac{(7.92)^2}{10} = 6 \text{ Watt}$$

- من أجل $(\alpha = 180^o)$:-

$$V_{ave} = \frac{V_m}{2\pi}[1 + Cos\,\alpha] = \frac{170}{2\pi}\left[1 + Cos\,180^o\right] = 0V$$

$$P_L = 0$$

نلاحظ من المثال السابق أن القيم المتوسطة للجهد والقدرة على الحمل تقل بزيادة قيمة (α).

مثال (٤-٢):- دائرة تقويم محكوم أحادي الطور نصف موجة تغذي من مصدر جهد قيمته $(150V)$ بتردد $(60Hz)$ وحمل مادي قيمته تساوي $(R = 10\Omega)$، أذا كانت زاوية القدح للثايرستور $(\alpha = 30^o)$. المطلوب إيجاد:-

١- القيمة العظمى لتيار الحمل. ٢- القيمة المتوسطة لجهد وتيار الحمل

٣- القيمة المتوسطة لتيار الحمل ٤-القيمة الفعالة لتيار الحمل.

٥- القدرة الفعالة على طرفي الحمل ٦- زاوية التوصيل (Conduction Angle)

٧- تردد موجة الخرج ٨- معامل القدرة للحمل.

الحل:-

$$V_m = \sqrt{2}\ V_S = \sqrt{2} \times 150 = 212V$$

$$1-\ \ I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{212}{10} = 21.2\ A$$

$$2-V_{ave} = \frac{V_m}{2\pi}(1 + Cos\,\alpha) = \frac{212}{2\pi}\left(1 + Cos\,30^o\right) = 63V$$

$$3-\ \ I_{ave} = \frac{I_m}{2\pi}(1 + Cos\,\alpha) = \frac{V_{ave}}{R} = \frac{63}{10} = 6.3\,A$$

$$4-I_R = \frac{I_m}{2}\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{Sin2\alpha}{\pi}} = \frac{21.2}{2}\sqrt{1 - \frac{30}{180} + \frac{Sin60}{180}} = 10.5\ A$$

$$5-\ P_L = I_R^2 \times R = (105)^2 \times 10 = 1102.5 \text{ Watt}$$

$$6-\ \gamma = \pi - \alpha = 180 - 30 = 150^o$$

$$7-\ \text{Ripple frequency} = f_r = f_S = 60Hz$$

$$8-\ S = V_S \times I_R = 150 \times 10.5 = 1575\ VA$$

$$PF = \frac{P}{S} = 0.7$$

مثال (٤-٣):- دائرة تقويم محكوم أحادي الطور نصف موجة تغذي من مصدر جهد قيمته $(120V)$. المطلوب حساب قيمة زاوية القدح للثايرستور من أجل الحصول على قدرة $(150Watt)$ لحمل مادي قيمته تساوي $(R = 10\Omega)$.

الحل :-

$$V_{ave} = \frac{V_m}{2\pi}(1 + Cos\alpha)$$

$$V_{ave}\ 2\pi = V_m(1 + Cos\alpha)$$

$$1 + Cos\alpha = \frac{V_{ave}\ 2\pi}{V_m} \Rightarrow Cos\alpha = \frac{2\pi}{V_m}V_{ave} - 1$$

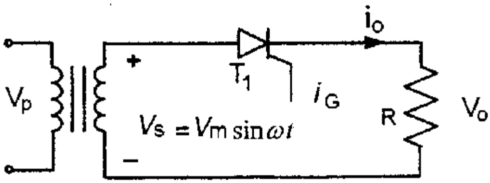
$$\alpha = Cos^{-1}\left[\frac{2\pi}{V_m}V_{ave} - 1\right]$$

$$V_m = \sqrt{2}\ V_S = \sqrt{2} \times 120 = 170V$$

$$P_{ave} = \frac{V_{ave}^2}{R} \quad \Rightarrow V_{ave} = \sqrt{P_{ave} \times R} = \sqrt{150 \times 10} = 38.7\ V$$

$$\alpha = Cos^{-1}\left[\frac{2\pi}{V_m}V_{ave} - 1\right] = Cos^{-1}\left[\frac{2\pi}{170} \times 38.7 - 1\right] = 64.5^o$$

مثال (٤-٤):- للدائرة المبينة في الشكل (٤-٥) وعلى اعتبار أن الحمل مادي بحت (R) وزاوية القدح للثايروستور (T_1) تساوي $\left(\alpha=\frac{\pi}{2}\right)$ أوجد:-



الشكل (٤-٥)

١- المردود (η) . ٢- معامل الشكل $(F.F)$.

٣ - معامل التموج (RF) . ٤- معامل الاستخدام (TUF) .

٥- القيمة العظمى لجهد الانحياز العكسي (PIV) للثايروستور (T_1).

الحل:-

من اجل $\left(\alpha=\frac{\pi}{2}\right)$ فان:-

$$V_{dc}=\frac{V_m}{2\pi}\left(1+Cos\alpha\right)=\frac{V_m}{2\pi}=0.1592\,V_m$$

$$I_{dc}=\frac{V_{dc}}{R}=\frac{0.1592\,V_m}{R}$$

$$V_{rms}=\frac{V_m}{2}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left[\pi-\alpha+\frac{Sin\,2\alpha}{2}\right]}=0.3536\,V_m$$

$$I_{rms}=\frac{V_{rms}}{R}=\frac{0.3536\,V_m}{R}$$

$$P_{dc}=V_{dc}\times I_{dc}=\frac{\left(0.1592\,V_m\right)^2}{R}$$

$$P_{ac}=V_{rms}\times I_{rms}=\frac{\left(0.3536\,V_m\right)^2}{R}$$

١- $$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{(0.1592\,V_m)^2/R}{(0.3536\,V_m)^2/R} = 20.27\,\%$$

٢- $$F.F = \frac{V_{\text{rms}}}{V_{dc}} = \frac{0.3536\,V_m}{0.1592\,V_m} = 2.221 = 222.1\,\%$$

٣- $$RF = \sqrt{(F.F)^2 - 1} = 1.983 = 198.3\,\%$$

٤- جهد الملف الثانوي للمحول يساوي الى:-

$$V_S = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707\,V_m$$

تيار الثانوي للمحول له نفس القيمة الفعالة لتيار الحمل $(I_S = I_{rms})$:-

$$P_{VA} = V_S \times I_S = 0.707\,V_m \times \frac{0.3536\,V_m}{R}$$

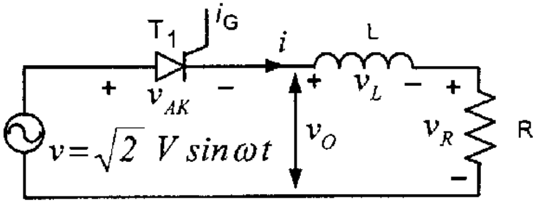
$$TUF = \frac{P_{dc}}{P_{VA}} = \frac{(0.1592)^2}{0.707 \times 0.3536} = 0.1014$$

٥- $$PIV = V_m$$

من المعادلات السابقة نلاحظ أن محددات المقوم تنخفض عند القيمة المنخفضة لزاوية القدح (α).

٤-١-١-٢- دوائر التقويم المحكوم أُحادي الطور نصف موجة بحمل مادي-حثي
Single-Phase Half-Wave Controlled Rectifiers with RL load circuit.

الدائرة الكهربائية لهذا المقوم مبينة في الشكل (٤-٦)، فإذا تم تطبيق إشارة تحكم على بوابة الثايرستور في الدائرة، فإن الثايرستور سوف يتحول الـــى حالـــة التوصيل ويكون:-



الشكل (٤-٦)

$$v_L + v_R = v_o = v$$

$$L\frac{di}{dt} + Ri = V_m \, Sin\,\omega t \tag{4.9}$$

والحل العام لهذه المعادلة التفاضلية يكون من الشكل:-

$$i = \frac{V_m}{Z} Sin(\omega t - \phi) + Ae^{-\frac{R.t}{L}} \tag{4.10}$$

حيث أن :-

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

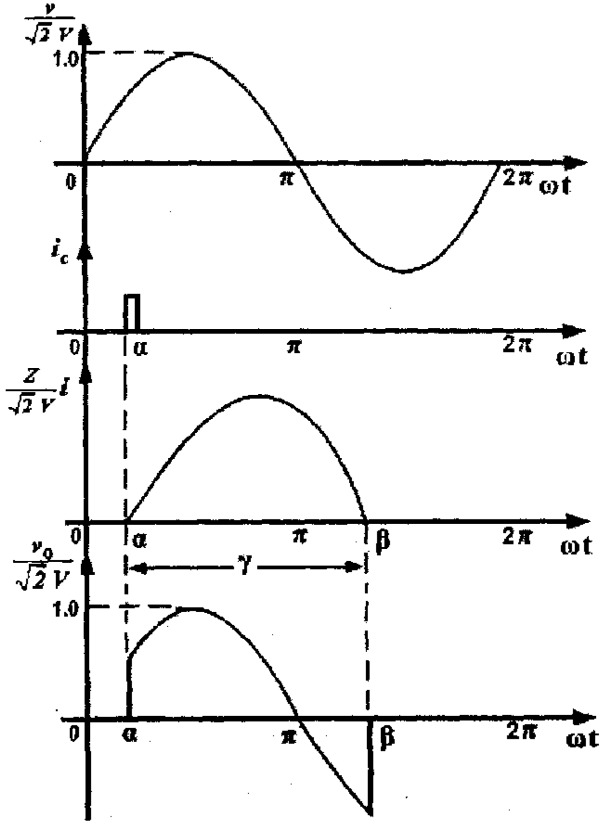
$$\phi = \tan^{-1}\frac{\omega L}{R}$$

يتم احتساب قيمة الثابت (A) من الشروط الابتدائية. وكما يظهر من شكل موجة الخرج في الشكل (٤-٧) عند الزمن $(\omega t = \alpha)$، فإن قيمة التيار $(i = 0)$.

وبالتعويض في معادلة الحل العام نحصل على:-

$$i = 0 = \frac{V_m}{Z} Sin(\alpha - \phi) + Ae^{-\frac{R.\alpha}{\omega.L}} \Rightarrow$$

$$A = -\frac{V_m}{Z} Sin(\alpha - \phi)\, e^{\frac{R.\alpha}{\omega.L}} \tag{4.11}$$



الشكل(٤-٧)

شكل موجة الخرج لمقوم محكوم بحمل مادي حثي

بتعويض قيمة (A) في معادلة الحل العام نحصل على:-

$$i=\frac{V_m}{Z}Sin(\omega t-\phi)-\frac{V_m}{Z}Sin(\alpha-\phi)\,e^{\frac{R.\alpha}{\omega.L}}\times e^{-\frac{R.t}{L}}$$

$$i=\frac{V_m}{Z}\left[Sin(\omega t-\phi)-Sin(\alpha-\phi)\,e^{\frac{R}{L}\left(\frac{\alpha}{\omega}-t\right)}\right] \qquad (4.12)$$

وكذلك فإن قيم التيار تساوي الصفر في اللحظة $(\omega t=\beta)$. وبالتالي بالتعويض في المعادلة (٤-١٢) نحصل على:-

$$0=\frac{V_m}{Z}\left[Sin(\beta-\phi)-Sin(\alpha-\phi)\,e^{\frac{R}{L}\left(\frac{\alpha-\beta}{\omega}\right)}\right]$$

$$Sin(\beta-\phi)=Sin(\alpha-\phi)\,e^{\frac{R}{L}\left(\frac{\alpha-\beta}{\omega}\right)} \qquad (4.13)$$

وبحل هذه المعادلة يمكن الحصول على قيم (β).

زاوية التوصيل (γ) تساوي:-

$$\gamma=\beta-\alpha \qquad (4.14)$$

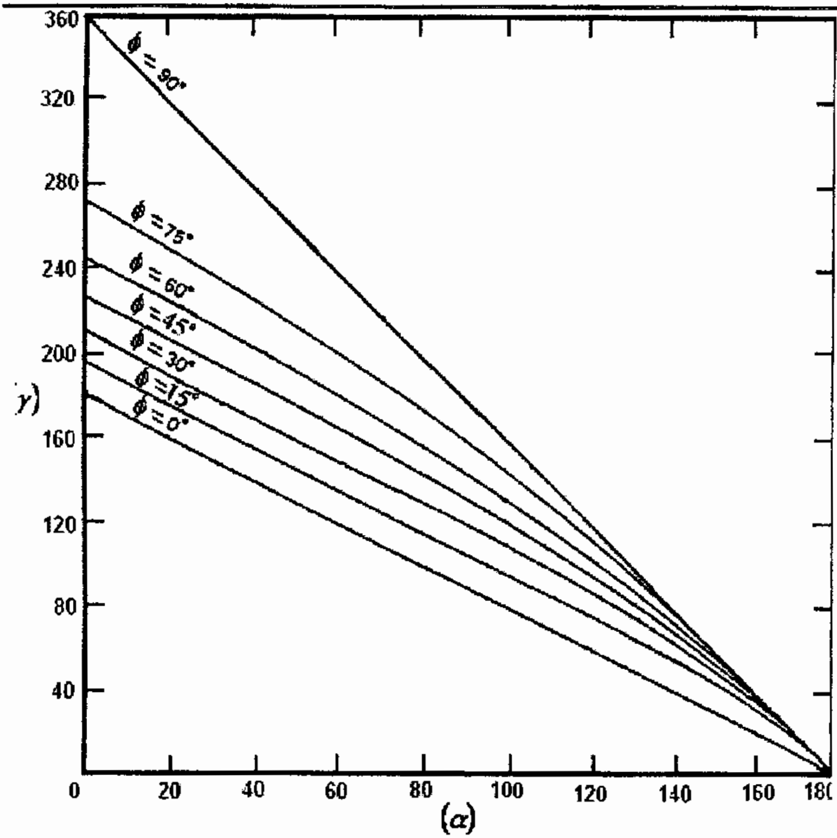
إن مجموعة المنحنيات التي تبين علاقة (γ) مع (α) من أجل قيم مختلفة لـ (ϕ)، والتي يمكن الحصول عليها من المعادلة (٤-١٣) والمعادلة (٤-١٤) مبينة في الشكل (٤-٨). من المعادلة رقم (٤-١٢) يمكن تحديد قيمة (I_N) من :-

$$I_N=\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma}\left[Sin(\omega t-\phi)-Sin(\alpha-\phi)\,e^{\frac{R}{L}\left(\frac{\alpha}{\omega}-t\right)}\right]d\omega t \qquad (4.15)$$

وبالتالي يمكن الحصول على مجموعة المنحنيات التي تبين علاقة (I_N) مع (α) من أجل قيم مختلفة لـ (ϕ)، كما هو مبين في الشكل (٤-٣). كذلك فإن قيمة (I_{RN}) تعطى بالعلاقة:-

$$I_{RN} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma}\left[Sin(\omega t-\phi)-Sin(\alpha-\phi)\,e^{\frac{R}{L}\left(\frac{\alpha}{\omega}-t\right)}\right]\,d\omega t} \quad (4.16)$$

ومجموعة المنحنيات التي تبين علاقة (I_{RN}) مع (α) من أجل قيم مختلفة لـ (ϕ)، كما هو مبين في الشكل (٤-٤).



الشكل (٤-٨)

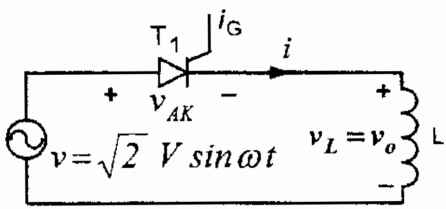
مجموعة المنحنيات التي تبين علاقة (γ) مع (α)

٤-١-١-٣- دوائر التقويم المحكوم أحادي الطور نصف موجة بحمل حثي

Single-Phase Half-Wave Controlled Rectifiers with Inductive load circuit.

الدائرة الكهربائية لهذا المقوم مبينة في الشكل (٤-٩)، فمن أجل حمل حثي نقي فإن قيمة $(Z = \omega L)$ وقيمة $\left(\phi = \dfrac{\pi}{2}\right)$، وبتعويض هذه القيم في المعادلة (٤-١٢) نحصل على:-

$$i = \frac{V_m}{\omega L}\left[Cos\alpha - Cos\,\omega t\right] \qquad (4.17)$$



الشكل (٤-٩)

الدائرة الكهربائية لمقوم محكوم بحمل حثي

وشكل موجة الخرج للجهد والتيار مبين في الشكل (٤-١٠).

زاوية التوصيل (γ) تعطى بالعلاقة :-

$$\beta = 2\pi - \alpha \qquad , \qquad \gamma = \beta - \alpha$$

وقيمة التيار (I_N) تعطى بالعلاقة:-

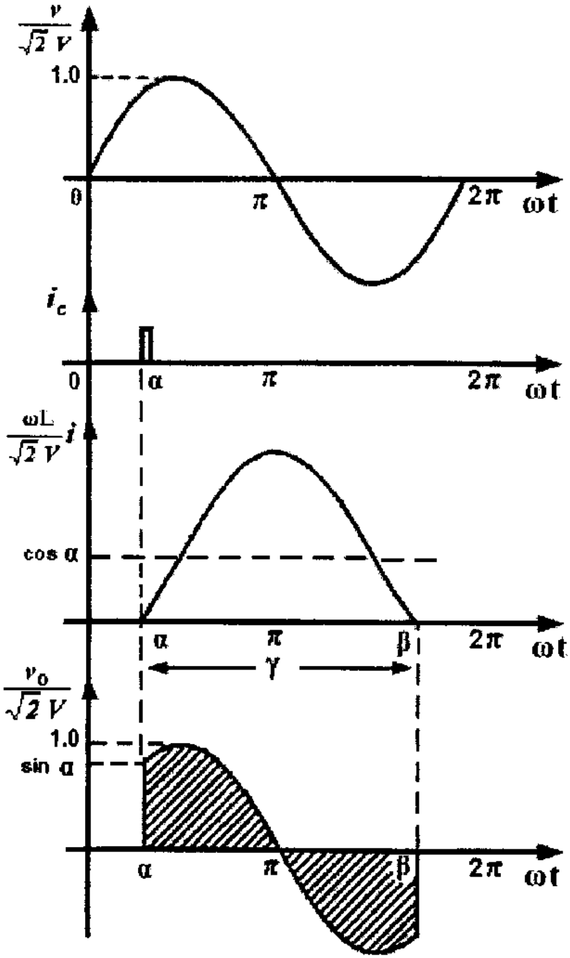
$$I_N = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{2\pi-\alpha}\left(Cos\alpha - Cos\,\omega t\right)d(\omega t)$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[(\pi - \alpha)\,Cos\alpha + Sin\alpha\right] \qquad (4.18)$$

ويمكن تحديد قيمة (I_N) من أجل قيمة معينة لـ (α) من المنحنيات المبينة في الشكل (٤-٣) عند قيمة $(\phi = 90^o)$.

وكذلك فإن قيمة (I_{RN}) تعطى بالعلاقة:-

$$I_{RN} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{2\pi-\alpha}(Cos\alpha - Cos\omega t)^2\, d(\omega t)} \qquad (4.19)$$



الشكل (٤-١٠)

شكل موجة الخرج للجهد والتيار بحمل حثي

ويمكن تحديد قيمة (I_{RN}) من أجل قيمة معينة لــ (α) من المنحنيات المبينة فـــي الشكل (٤-٤) من اجل قيمة $(\phi = 90^{\circ})$. من هذه الدائرة تكون القيمة المتوســطة للجهد على طرفي الملف من أجل دورة واحدة تساوي الصفر، عندها فــإن قيمــة الجزئيين المظللين في الشكل (٤-١٠) يجب أن يكونان متساويين. وهذا يعنـــي أن القيمة المتوسطة على طرفي الملف تساوي الصفر، بينما القيمـــة (V_{RN}) تعطـــى بالعلاقة:-

$$V_{RN} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} Sin^2\,\omega t\; d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{1}{4\pi}Sin2\alpha}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{Sin2\alpha}{2\pi}} \qquad (4.20)$$

وبالتالي فإن القيمة الفعالة للجهد على طرفي الحمل تعطى بالعلاقة:-

$$V_R = V_m \,.V_{RN} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{Sin2\alpha}{2\pi}} \qquad (4.21)$$

مثال (٤-٥):- للدائرة المبينة في الشكل (٤-٦)، القيمة الفعالة لجهـــد المـــصدر تساوي $(100V)$. المطلوب حساب القيمة المتوسطة والقيمة الفعالة لتيـــار الحمـــل، ورسم شكل الموجـــة للجهـــد (v_{AK}) علـــى أطـــراف الثايرســـتور مـــن أجـــل $(\alpha = 45^{\circ}\ ,\ \alpha = 135^{\circ})$ للأحمال التالية:-

1- $R = 10\Omega \quad , \quad L = 0$

2- $R = 10\Omega \quad , \quad \omega L = 10\Omega$

الحل:-

١- من أجل $(\alpha = 45^{\circ})$ وحمل مادي $(R = 10\Omega \quad , \quad L = 0)$ و $(\phi = 0)$، مـــن المنحنيات في الشكل (٤-٣) فإن قيمة (I_N) تساوي:-

$$I_N = 0.27$$

ومن الشكل (٤-٤) فإن قيمة (I_{RN}) تساوي:-

$$I_{RN} = 0.48$$

وقيمة التيار:-

$$I_{Base} = I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{100 \times \sqrt{2}}{10} = 14.14 \ \ A$$

وبالتالي فإن:-

$$I_N = \frac{I_o}{I_m} \Rightarrow I_o = I_N \times I_m = 0.27 \times 14.14 = 3.82\,A$$

$$I_{RN} = \frac{I_R}{I_m} \Rightarrow I_R = I_{RN} \times I_m = 0.48 \times 14.14 = 6.8\,A$$

من أجل $(\alpha = 135^o)$ $(\phi = 0)$ومن المنحنيات في الشكل (٤-٣) والـشكل (٤-٤) نجد:-

$$I_N = 0.05 \quad \text{و} \quad I_{RN} = 0.1$$

$$I_o = 0.05 \times 14.14 = 0.71\,A$$

$$I_R = 0.1 \times 14.14 = 1.14 \quad A$$

وشكل موجة الجهد على طرفي الثايرستور $(\phi = 0)$ مبينة في الشكل (٤-١١-أ).

٢- من أجل $(L = 10 \quad , \quad R = 10\Omega)$ فإن:-

$$\phi = \tan^{-1}\frac{\omega L}{R} = \tan^{-1}\frac{10}{10} = 45^o$$

من الشكل (٤-٨) من أجل $(\alpha = 45^o)$ و $(\phi = 45^o)$، فتكون قيمة زاوية التوصيل $(\gamma = 180^o)$.

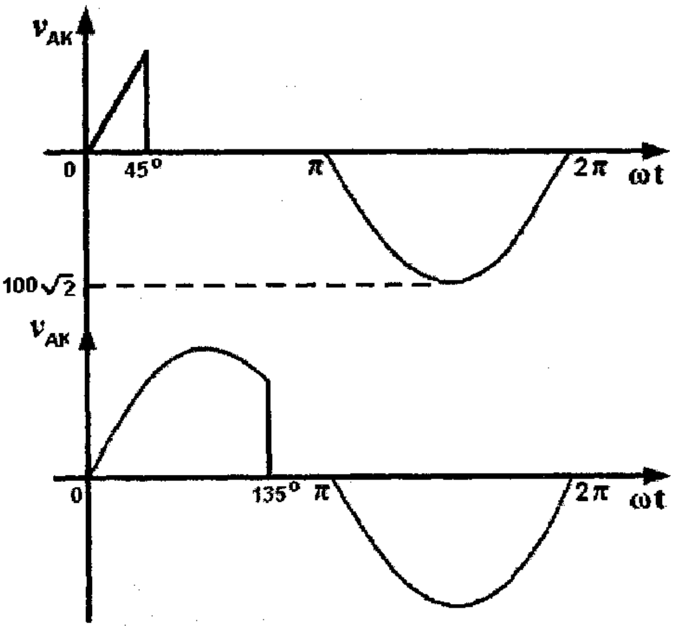
من المنحنيات في الشكل (٤-٣) والشكل (٤-٤) نجد أن:-

$$I_N = 0.32 \qquad\qquad I_{RN} = 0.5$$

$$I_{Base} = I_m = \frac{V_m}{Z} = \frac{100 \times \sqrt{2}}{\sqrt{10^2 + 10^2}} = 10 \ \ A$$

$$I_o = 0.32 \times 10 = 3.2\,A$$

$$I_R = 0.5 \times 10 = 5\,A$$



الشكل (٤-١١-أ)

شكل موجة الجهد على طرفي الثايرستور

من أجل $(L = 10 \quad , \quad R = 10\Omega)$ فإن:-

من الشكل (٤-٨) من أجــل $(\alpha = 135^o)$ و $(\phi = 45^o)$، فتكــون قيمــة زاويــة التوصيل $(\gamma = 74^o)$.

من المنحنيات في الشكل (٤-٣) والشكل (٤-٤) نجد أن:-

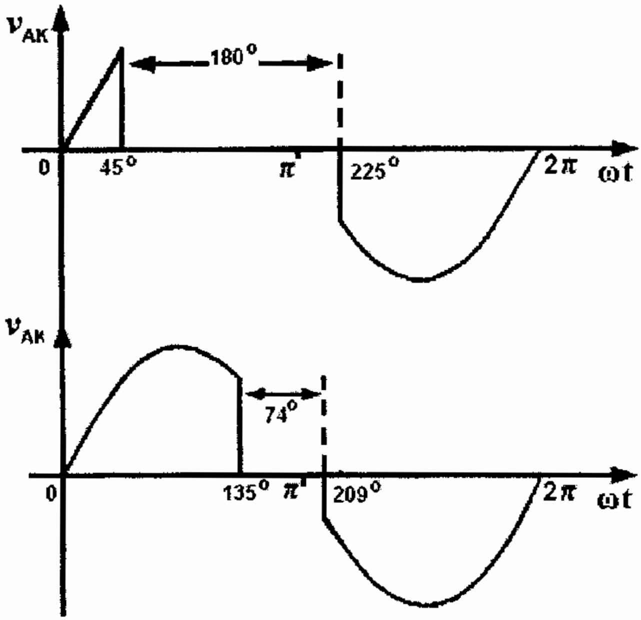
$$I_N = 0.05 \qquad\qquad I_{RN} = 0.1$$

وبالتالي فإن قيمة:-

$$I_o = 0.05 \times 10 = 0.5\,A$$

$$I_R = 0.1 \times 10 = 1A$$

وشكل موجة الجهد على طرفي الثايرستور (V_{AK})، من أجل $(\phi = 45^o)$ مبينة في الشكل (٤-١١- ب).



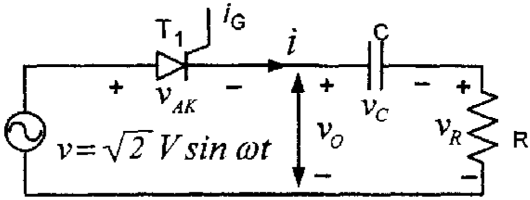
الشكل (٤-١١- ب)

شكل موجة الجهد على طرفي الثايرستور

٤-١-١-٤- دوائر التقويم المحكوم أحادي الطور نصف موجة بحمل مادي سعوي:-

Single-Phase Half-Wave Controlled Rectifiers with RC load circuit.

الدائرة الكهربائية لهذا المقوم مبينة في الشكل (٤-١٢)، عندما يتم تطبيق إشارة تحكم على بداية الثايرستور ويتحول الى حالة التوصيل فإن:-



الشكل (٤-١٢)

الدائرة الكهربائية لمقوم محكوم بحمل مادي سعوي

$$v_C + v_R = v_o = v$$

$$\frac{1}{C}\int i\,dt + iR = V_m Sin\,\omega t \qquad (4.22)$$

والحل العام للمعادلة (٤-٢٢):-

$$i = \frac{V_m}{Z} Sin(\omega t + \phi) + Ae^{-\frac{t}{R.C}} \qquad (4.23)$$

يتم تحديد قيمة الثابت (A) من الشروط الابتدائية. أذا كان المكثف غير مشحون بشكل مسبق، وفي اللحظة $(\omega t = \alpha)$ يكون الجهد $(V_C = 0)$، وتكون قيمة التيار في الدائرة مساوية:

$$i = \frac{V_m}{R} Sin\,\alpha \qquad (4.24)$$

وبالتعويض في معادلة التيار نحصل على:-

$$\frac{V_m}{R} Sin\,\alpha = \frac{V_m}{Z} Sin(\alpha+\phi) + A\, e^{-\frac{\alpha}{\omega}\left(\frac{1}{R.C}\right)} \qquad (4.25)$$

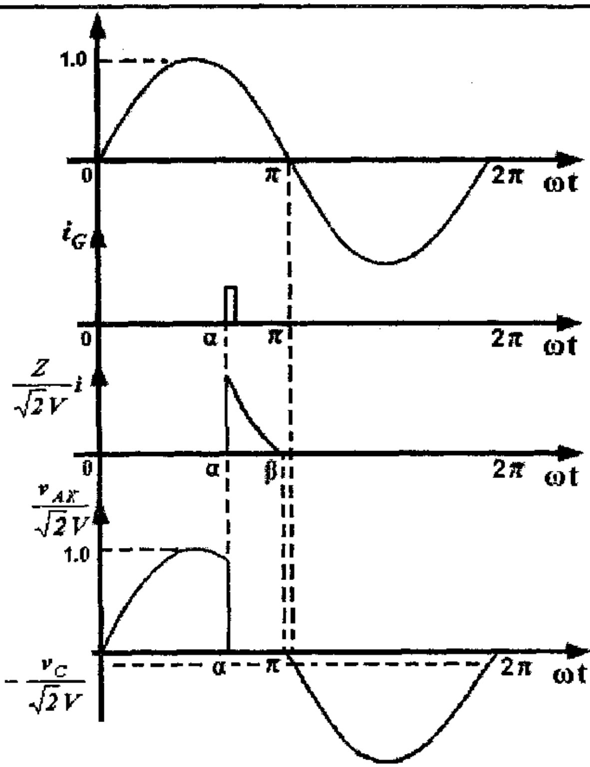
$$A = V_m \left[\frac{1}{R} Sin\,\alpha - \frac{1}{Z} Sin(\alpha+\phi) \right] e^{\frac{\alpha}{\omega}\left(\frac{1}{R.C}\right)}$$

وبالتالي فإن قيمة التيار تساوي:-

$$i = \frac{V_m}{Z} Sin(\omega t+\phi) + V_m \left[\frac{1}{R} Sin\,\alpha - \frac{1}{Z} Sin(\alpha+\phi) \right] e^{\frac{\alpha}{\omega}\left(\frac{1}{R.C}\right)} \times e^{-\frac{t}{R.C}}$$

بضرب طرفي المعادلة بـ $\left(\frac{Z}{V_m}\right)$ نحصل على :-

$$i \times \frac{Z}{V_m} = Sin(\omega t+\phi) + \left[\frac{Z}{R} Sin\,\alpha - Sin(\alpha+\phi) \right] e^{\frac{\alpha}{\omega}\left(\frac{1}{R.C}\right)} \times e^{-\frac{t}{R.C}} \qquad (4.26)$$



الشكل (٤-١٣)

شكل موجة الخرج للجهد والتيار

يبين الشكل (٤-١٣) شكل موجة الخرج للجهد والتيار. وتكون قيمة الجهـد (v_C) موجبة في نهاية فترة التوصيل للثايرستور، وتزداد هذه القيمة عند كل نبضـة مـن نبضات تيار المقوم حتى يتوقف التوصيل، وتكون قيمة هذا الجهد تساوي:-

$$V_C = V_m \qquad \alpha < \frac{\pi}{2}$$

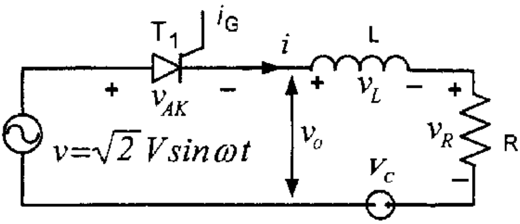
$$V_C = V_m \; Sin\,\alpha \qquad \alpha > \frac{\pi}{2}$$

وإذا كانت قيمة المقاومة $(R=0)$ فإن قيمة الجهد (V_C) تصل قيمتها العظمى عند النبضة الأولى للتيار. وإذا كانت $(\alpha \neq 0)$، فإن نبضة كبيرة القيمة من التيار سوف تمر في اللحظة $(\omega t=\alpha)$. مما يجعل قيمة الجهد $(V_C = V_m Sin\alpha)$ مما قد يؤدي الى تحطيم الثايرستور.

٤-١-١-٥- دوائر التقويم المحكوم أحادي الطور نصف موجة بحمل مادي حثي وقوة دافعة كهربائية.

Single-Phase Half-Wave Controlled Rectifiers with RL load and electromotive force circuit.

الدائرة الكهربائية لهذا المقوم مبينة في الشكل (٤-١٤) وشكل الإشارة الخارجة للفولطية مبينة في الشكل (٤-١٥).



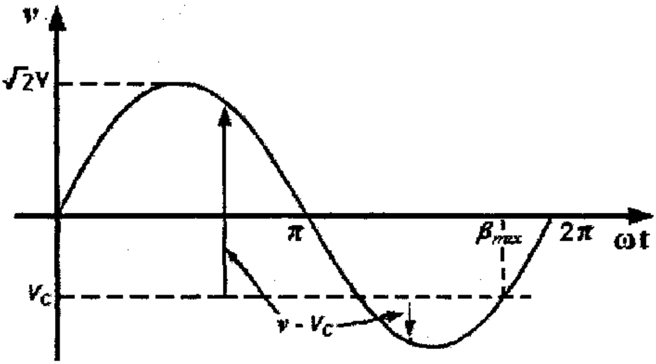
الشكل (٤-١٤)

الدائرة الكهربائية لمقوم محكوم بحمل حثي وقوة دافعة كهربائية

لتحليل هذه الدائرة لا بد من الاستفادة من التحليل السابق الذي تم التوصل إليه من خلال التقويم غير المحكوم. الزاوية التي يمكن أن تطبق على هذه الدائرة ويبدأ عندها التوصيل تساوي:-

$$\zeta = Sin^{-1}\frac{V_C}{V_m} = Sin^{-1}m \qquad rad \qquad (4.27)$$

حيث أن:-
$$m = \frac{V_C}{V_m}$$



الشكل (٤-١٥)

إشارة التحكم بتقويم نصف موجة مع قوة دافعة كهربائية

إذا تم تطبيق نبضة موجبة (i_G) على بوابة الثايرستور قبل هذه الزاوية، وكانت هذه النبضة غير متكررة، فإنه لن يحدث في هذه الحالة توصيل. وبالتالي لا بد من تطبيق إشارة قدح عند اللحظة $(\omega t = \alpha)$، بحيث تكون قيمة $(\alpha \geq \zeta)$ من أجل الحصول على توصيل لهذا الثايرستور مع مراعاة كون الجهد $(v \geq V_C)$ حتى يتم الحصول على انحياز أمامي للثايرستور، وفي هذه الحالة فقط يمكن أن يمر التيار المعطى بالعلاقة:-

$$i \times \frac{Z}{V_m} = Sin(\omega t - \phi) - \left[\frac{m}{Cos\phi} - \beta \, e^{\left(\frac{\alpha - \omega t}{\tan\phi}\right)} \right] \qquad (4.28)$$

$$; \alpha < \omega t < \alpha + \gamma$$

$$\beta = \frac{m}{Cos\phi} - Sin(\alpha - \phi) \qquad (4.29)$$

$$e^{-\gamma/\tan\phi} = \frac{\left(m/Cos\phi\right) - Sin(\alpha + \gamma - \phi)}{\left(m/Cos\phi\right) - Sin(\alpha - \phi)} \qquad (4.30)$$

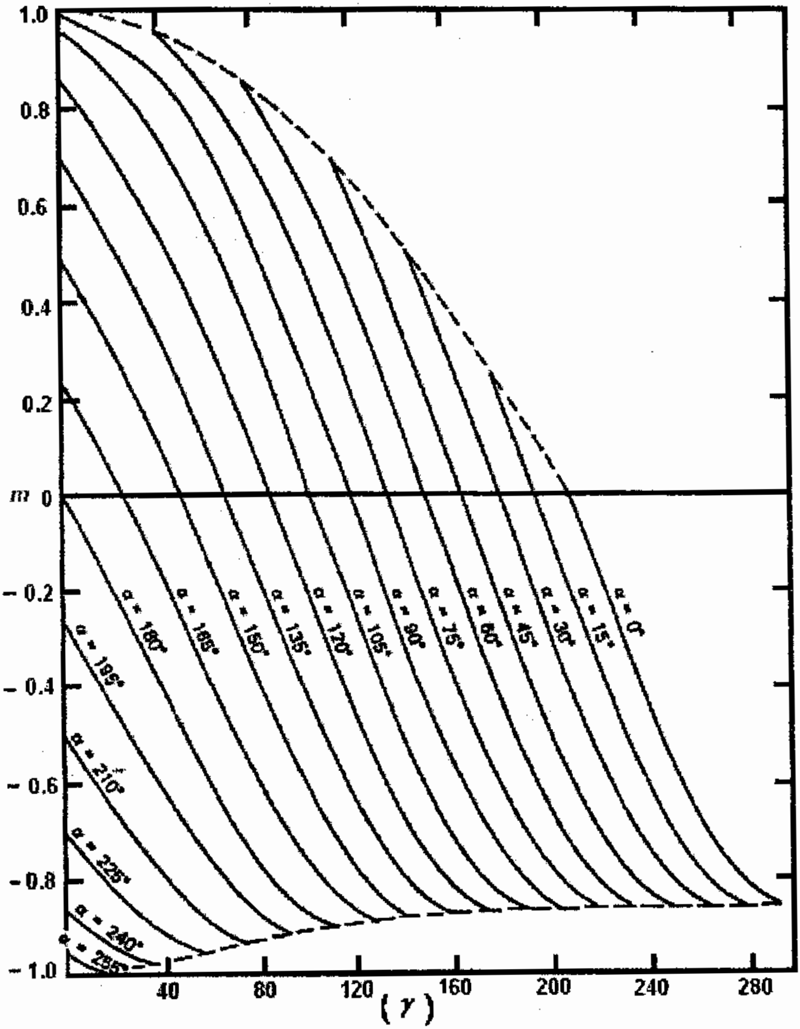
وهذه المعادلة تعطى مجموعة من المنحنيات من أجل قيمة محددة لـ(ϕ)، وتبين العلاقة بين $(\gamma\ ,m)$ من أجل قيم مختلفة لـ (α). فمن أجل $\left(\alpha = \frac{\pi}{6}\right)$ فإن هذه المنحنيات مبينة في الشكل (٤-١٦).الخط المتقطع المبين في الشكل يبين الحد الفاصل لإشارة التحكم، حيث أن القيم تحت هذا الخط لن تؤدي الى تحويل الثايرستور الى حالة التوصيل. ويمكن فهم التفسير الفيزيائي لهذا الحد الفاصل من الشكل (٤-١٥)، حي تظهر قيمة سالبة للجهد (V_C), فإذا كانت قيم الملف الموصول في الدائرة تمنع التيار من الوصول الى قيمة الصفر قبل الزمن $(\omega t = \beta_{max})$، حيث أن:-

$$\beta_{max} = 2\pi - Sin^{-1}\frac{|V_C|}{V_m} \qquad rad \qquad (4.31)$$

فإن الثايرستور لن يتحول الى حالة القطع وتكون محصلة القوة الدافعة بالإتجاه الموجب للدائرة وذات قيم موجبة عند الزمن $(\omega t > \beta_{max})$. لأن الثايرستور يحتاج الى وقت طويل حتى يتحول الى حالة القطع في هذه الحالة، لذلك لا بد من أن تكون الإشارة المطبقة من أجل الثايرستور عند زاوية $(\omega t < \beta_{max})$.

قيمة التيار (I_N) تعطى بالعلاقة:-

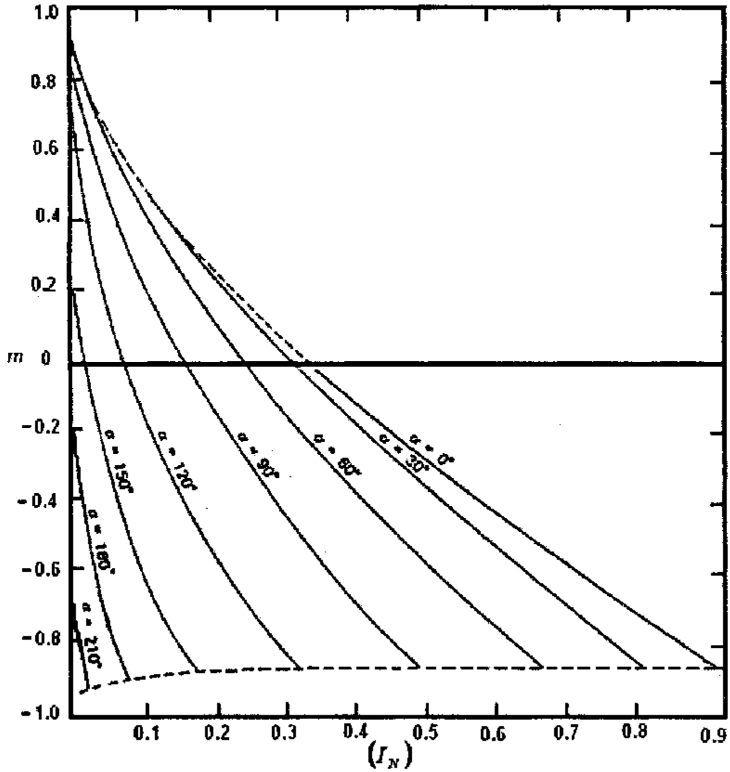
$$I_N = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \frac{Z}{V_m}.i\,d\omega t \qquad (4.32)$$



الشكل (٤-١٦)

العلاقة بين $(\gamma\ ,m)$ من أجل قيم مختلفة لـ (α)، $\left(\phi = \pi/6\right)$

ومن أجل قيم (m) و (ϕ) و (α) يمكن تحديد قيم (γ)، وبمعرفة هذه القيم الأربعة يمكن حساب قيمة التيار (I_N). والطريقة الأبسط لإيجاد قيمة التيار (I_N) من المعادلات السابقة هي باستخدام مجموعة المنحنيات لتحديد قيمة (γ) من أجل قيم (m) و (ϕ) و (α). ومن ثم إيجاد قيمة التيار (I_N) من أجل قيم معينة لـ (ϕ) . ومن خلال علاقة (I_N) مع (m) يمكن إيجاد قيم مختلفة لزوايا القدح (α)، كما هو مبين في الشكل (٤-١٧).

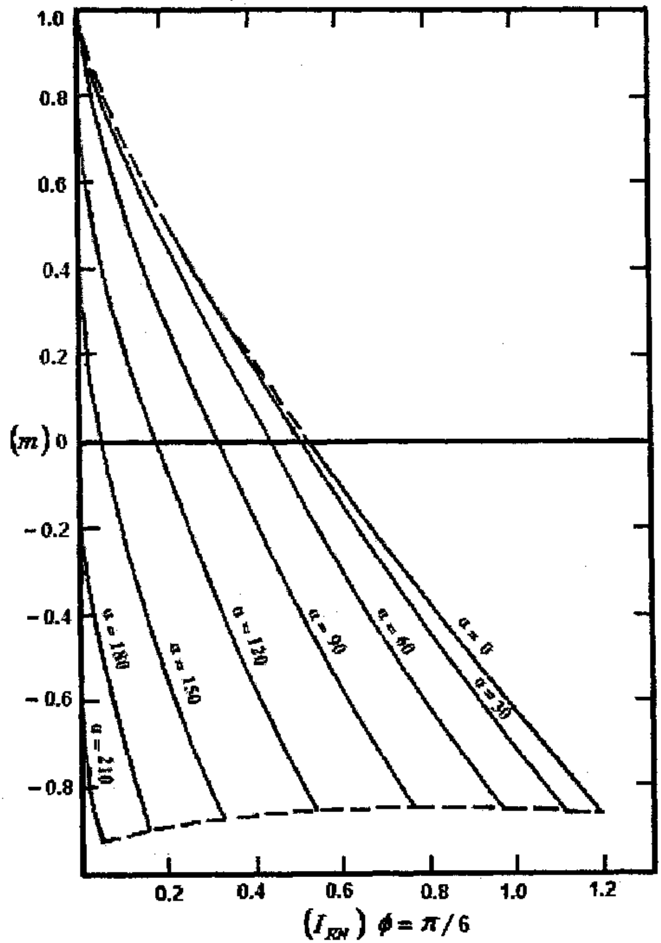


الشكل (٤-١٧)

علاقة (I_N) مع (m) عند قيم مختلفة لزوايا القدح (α)، $\left(\phi = \pi/6\right)$

تعطى قيمة (I_{RN}) للقيمة الفعالة لتيار الخرج بالعلاقة:-

$$I_{RN} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \left[\frac{Z}{V_m} . i\right]^2 d\omega t} \tag{4.33}$$



الشكل (٤-١٨)

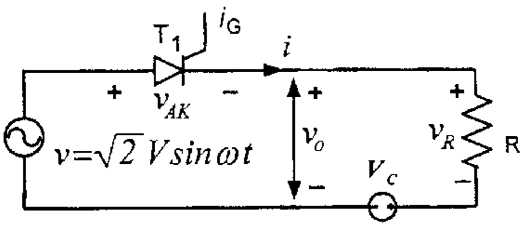
علاقة (I_{RN}) مع (m) عند قيم مختلفة لزوايا القدح (α)، $\left(\phi = \pi/6\right)$

وكما هو الحال في عملية حساب (I_N) من خلال المنحنيات فإنـــه أيــضا يمكــن حساب قيمة (I_{RN}) من أجل قيمة معينة (ϕ) وبمعرفة (m) و (ϕ) و (α). كمــا هو مبين في الشكل (٤-١٨).

حالات خاصة:-

١- إذا كانت $(L=0)$:- كما في الشكل (٤-١٩) الذي يبين الدائرة لهذه الحالـــة الخاصة، ويكون :-

$$\frac{R}{V_m} = Sin\,\omega t - m \qquad (4-34)$$



الشكل (٤-١٩)

الدائرة الكهربائية عندما $(L=0)$

والشكل (٤-٢٠) يبين موجة الخرج للتيار والجهد عندما $(L=0)$، حيث أن زاوية التوصيل تساوي:- $\gamma = (\pi - \zeta) - \alpha$

وحل هذه المعادلة يعطي مجموعة من المنحنيات موضحة فـــي الــشكل (٤-٢١). وكون أن الدائرة أومية فإن الحد عند $(m=-1)$ يبين الحد الفاصل بـــين التقـــويم المحكوم بتيار غير متصل والتقويم المحكوم بتيار متصل.

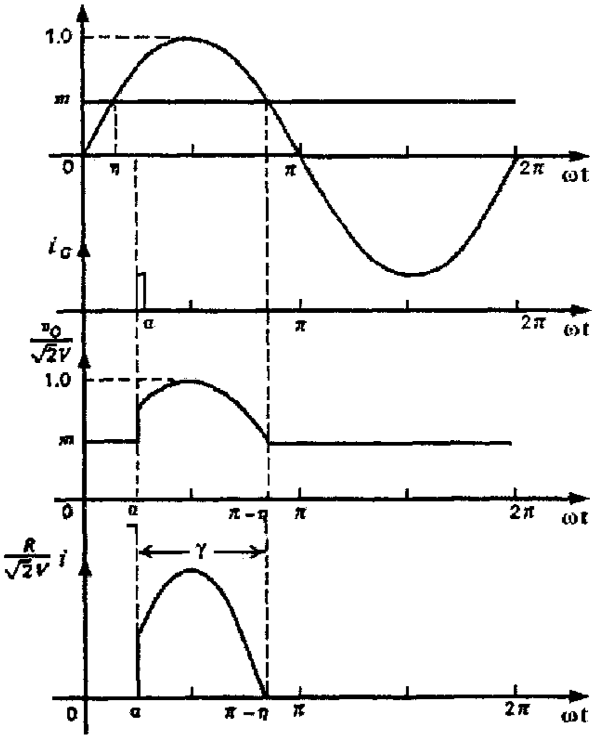
وتعطى قيمة تيار المقوم (I_N) بالعلاقة:-

$$I_N = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi-\zeta}(Sin\,\omega t - m)\,d\omega t$$
$$= \frac{1}{2\pi}\left[Cos\,\alpha + \sqrt{1-m^2} - m(\pi - \zeta - \alpha)\right] \qquad (4.35)$$

من العلاقة (٤-٣٥) يمكن الحصول على مجموعة من المنحنيات تبين علاقة $(m = Sin\zeta)$ مع (I_N) من أجل قيم مختلفة (α)، الشكل (٤-٢٢).

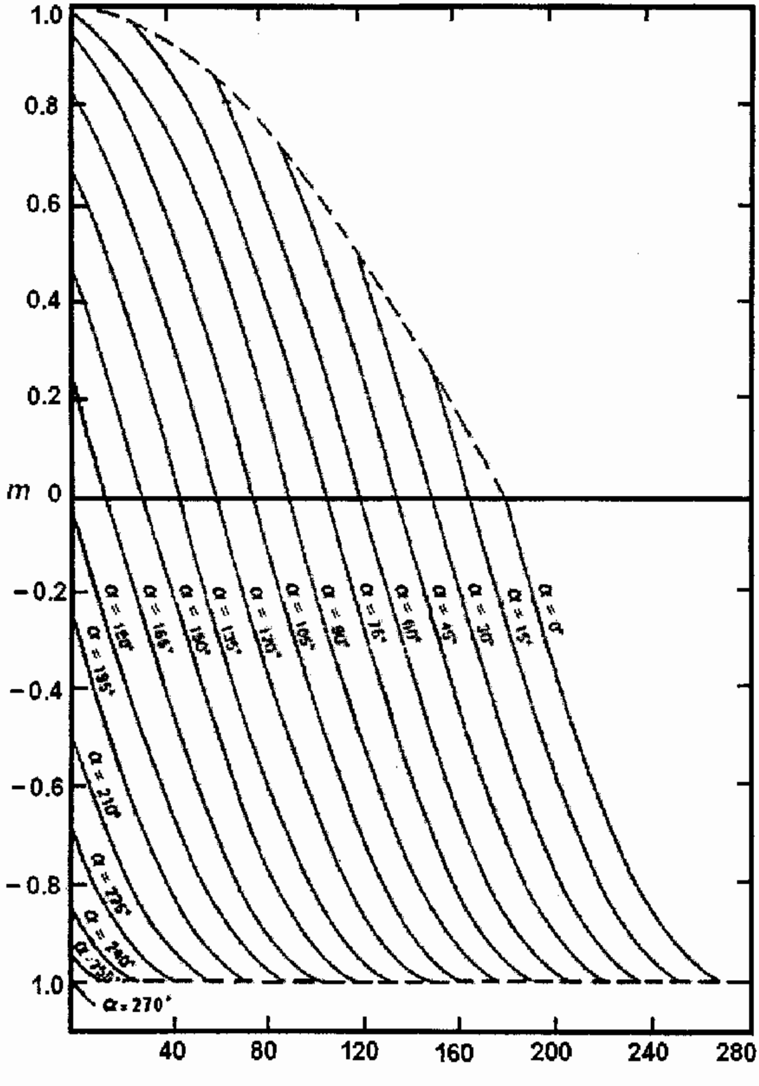
قيمة (I_{RN}) للقيمة الفعالة لتيار الخرج تعطى بالعلاقة:-

$$I_{RN} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\zeta} (Sin\omega t - m)^2 \, d\omega t} \qquad (4.36)$$



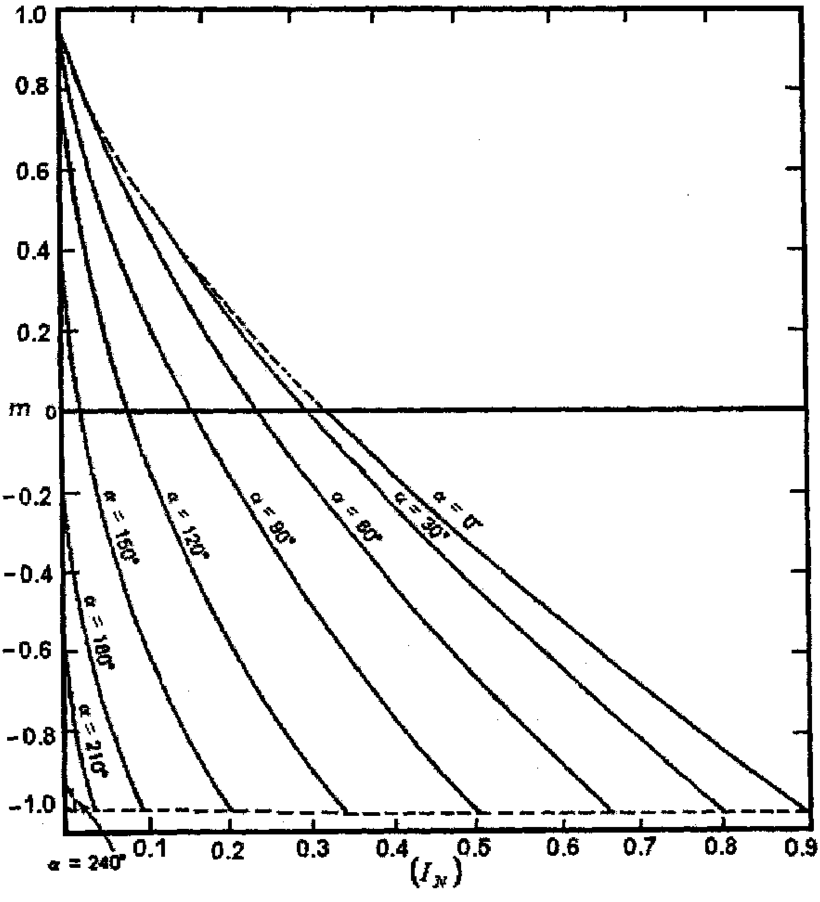
الشكل (٤-٢٠)

شكل موجة الخرج للتيار والجهد في حالة حمل أومي مع قوة دافعة كهربائية عندما $(L = 0)$



الشكل (٤-٢١)

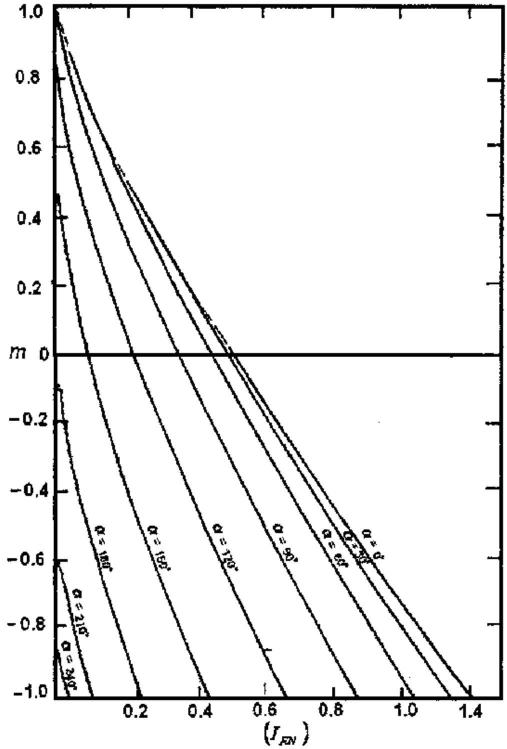
علاقة (γ) مع (m) عند قيم مختلفة لزوايا القدح وعند ($\phi = 0$)



الشكل (٤-٢٢)

علاقة (I_N) مع (m) عند قيم مختلفة لزوايا القدح (α) وعند $(\phi = 0)$

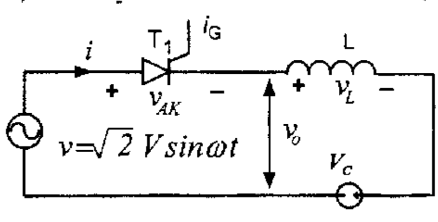
ويبين الشكل (٤-٢٣) مجموعة من المنحنيات تبين علاقة (m) مع (I_{RN}).



الشكل (٤-٢٣)

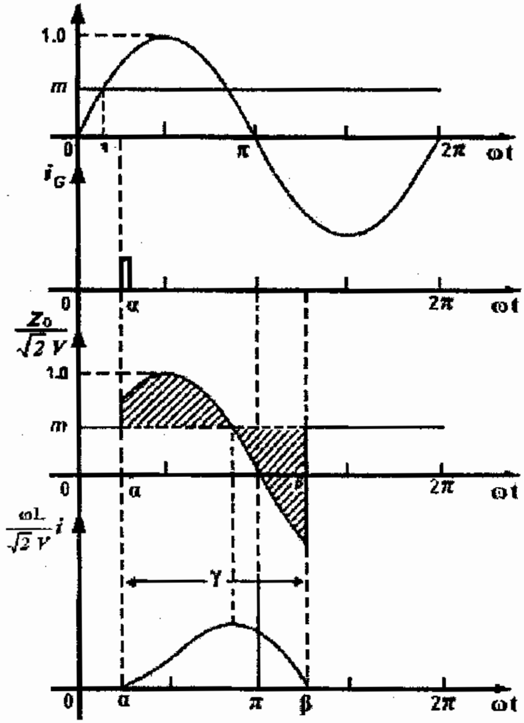
مجموعة من المنحنيات تبين علاقة (m) مع (I_{RN}) عندما $(\phi = 0)$ وقيم مختلفة لـــ (α)

٢- إذا كانت $(R = 0)$:- الدائرة الكهربائية مبينة في الشكل (٤-٢٤).



الشكل (٤-٢٤)

الدائرة الكهربائية للمقوم عندما $(R = 0)$



الشكل(٤-٢٥)

موجة الخرج للتيار والجهد في حالة حمل حثي مع قوة دافعة كهربائية $(R=0)$

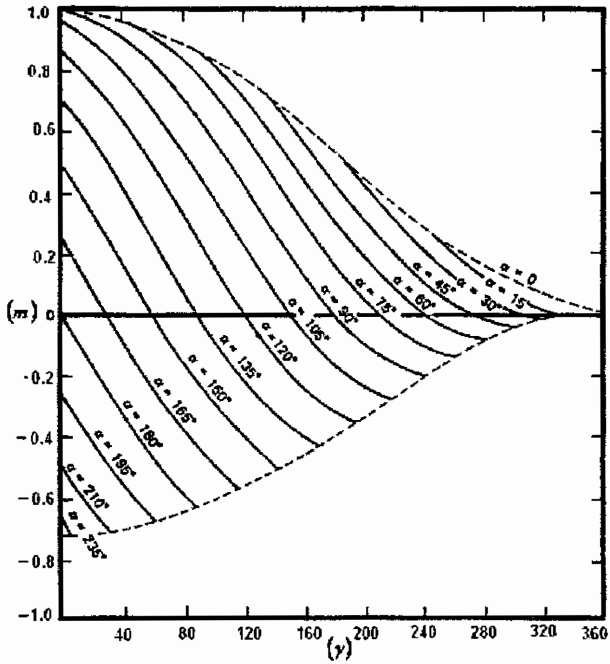
تعطى قيمة التيار بالعلاقة:-

$$\frac{\omega L}{V_m}.i = Cos\alpha - Cos\omega t - m(\omega t - \alpha) \qquad (4.37)$$

ويكون هذا التوصيل عند $(\omega t = \alpha + \gamma)$ وبالتالي:-

$$m.\gamma = Cos\alpha - Cos(\alpha + \gamma) \qquad (4.38)$$

والمنحنيين المظليين في الشكل (٤-٢٥) لشكل الموجة $\left(\frac{V_o}{V_m}\right)$ يجب أن يكونا متساويين.

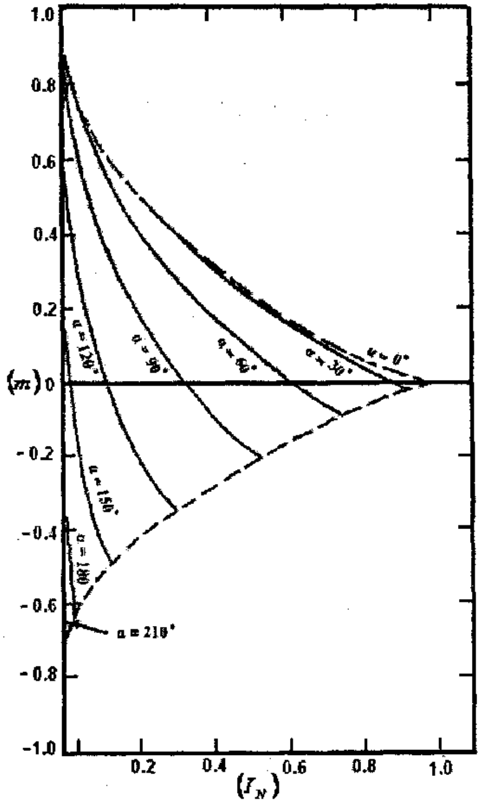


الشكل (٤-٢٦) مجموعة المنحنيات للعلاقة (m) و (γ)

مجموعة المنحنيات للعلاقة (m) و (γ) مبينة في الشكل (٤-٢٦)، ويظهر الحد الفاصل للتحكم بالخط المقطع لقيم التحكم، بحيث تكون القيم أعلى هذا الخط بقيم التحكم والقيم التي أسفل هذا الخط لن تؤدي الى قدح الثايرستور. ويمكن أن تزداد قيمة التيار الى حد الإشباع للملف الموجود في الدائرة. تعطى قيمة تيار المقوم (I_N) بالعلاقة:-

$$I_N = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\gamma}\left[Cos\,\alpha - Cos\,\omega t - m(\omega t - \alpha)\right]\,d\omega t$$

$$= \frac{1}{2\pi}\left[\gamma\,Cos\,\alpha + Sin\,\alpha - Sin(\alpha+\gamma) - m\frac{\gamma^2}{2}\right] \qquad (4.39)$$



الشكل (٤-٢٧) المنحنيات التي تبين علاقة (m) مع (I_N)

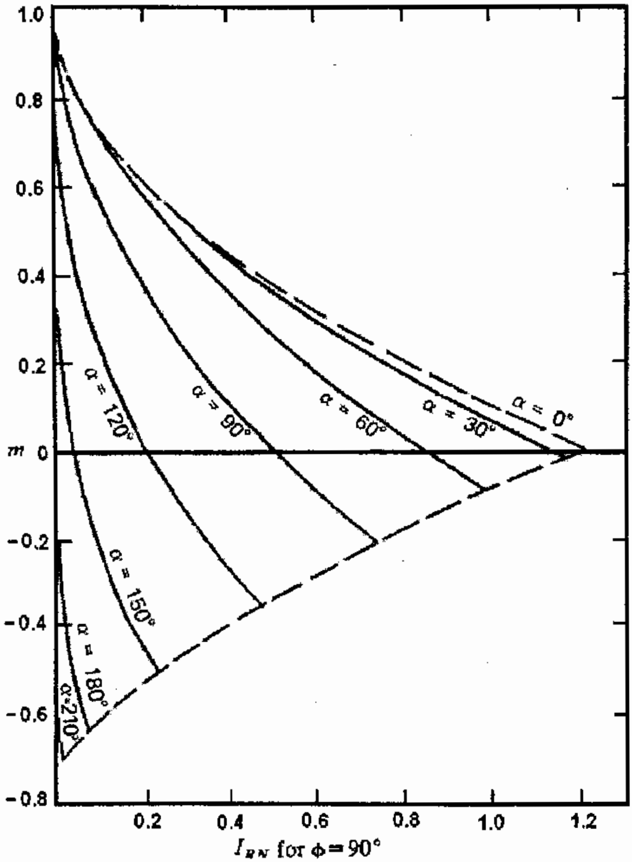
مجموعة المنحنيات التي تبين علاقة (m) مع (I_N) مبينة في الشكل (٤-٢٧).

وقيمة (I_{RN}) للقيمة الفعالة لتيار الخرج تعطى بالعلاقة:-

$$I_{RN} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\gamma}\left[Cos\,\alpha - Cos\,\omega t - m(\omega t - \alpha)\right]^2 d\omega t}$$

$$= \frac{1}{2\pi}\left[\gamma\,Cos\,\alpha + Sin\,\alpha - Sin(\alpha+\gamma) - m\frac{\gamma^2}{2}\right] \qquad (4.40)$$

في الشكل (٤-٢٨) مجموعة من المنحنيات التي تبين علاقة (m) مع (I_{RN}).



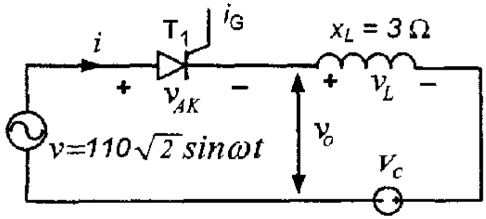
الشكل (٤-٢٨)

مجموعة من المنحنيات تبين علاقة (m) مع (I_{RN})

مثال (٤-٦):- الدائرة المبينة في الشكل (٤-٢٩) تستخدم لشحن مجموعة من البطاريات، الحد الأدنى لهبوط الجهد يساوي $(V_C = 72V)$. احسب القيمة المتوسطة والقيمة الفعالة لتيار الخط ومعامل القدرة للمصدر إذا كان:-

١- $V_C = 48V \;,\; \alpha = 60^o$ (تكون البطارية في حالة شحن).

٢- $V_C = 78V \;,\; \alpha = 120^o$ (تكون البطارية مشحونة بشكل كامل).



الشكل (٤-٢٩)

الحل:-

١- $\alpha = 60^o \qquad \phi = 90^o$

$$m = \frac{V_C}{V_m} = \frac{48}{110 \times \sqrt{2}} = 0.315$$

من الشكل (٤-٢٧) نجد أن التيار يساوي: $I_N = 0.27$

ومن الشكل (٤-٢٨) نجد أن: $I_{RN} = 0.43$

$$I_{Base} = I_m = \frac{V_m}{\omega \,.\, L} = \frac{110\sqrt{2}}{3} = 51.8 \;\; A$$

$$I_N = \frac{I_o}{I_m} \Rightarrow I_o = I_m . I_N = 51.8 \; \times 0.27 = 13.98 \quad A$$

$$I_{RN} = \frac{I_R}{I_m} \Rightarrow I_R = I_m . I_{RN} = 51.8 \; \times 0.43 = 22.27 \quad A$$

القدرة المزودة للبطارية تساوي:-

$$P = I_o \times V_C = 13.98 \times 48 = 671.04 \, watt$$

$$Power \;\; Factor = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} \times I_R} = \frac{617.04}{110 \times 22.27} = 0.27$$

١- $\phi = 90^o \qquad \alpha = 120^o$ ، $m = {}^{78}\!/_{110\sqrt{2}} = 0.5$

من الشكل (٤-٢٧) نجد أن التيار يساوي: $I_N = 0.015$

ومن الشكل (٤-٢٨) نجد أن: $I_{RN} = 0.03$

$$I_N = \frac{I_o}{I_m} \Rightarrow I_o = I_m . I_N = 51.8 \times 0.015 = 0.77 \ A$$

$$I_{RN} = \frac{I_R}{I_m} \Rightarrow I_R = I_m . I_{RN} = 51.8 \times 0.03 = 1.54 \ A$$

القدرة المزودة للبطارية تساوي:-

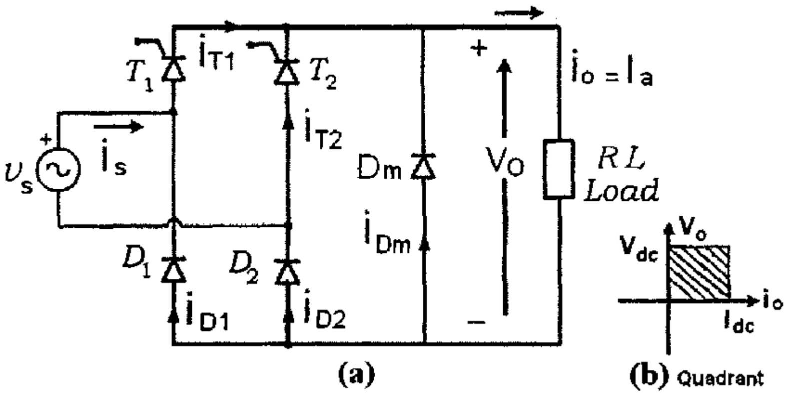
$$P = I_o \times V_C = 0.77 \times 78 = 60.06 \, watt$$

$$Power \ Factor = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} \times I_R} = \frac{60.06}{110 \times 1.54} = 0.36$$

٤-١-٢- المقوم المحكوم النصفي أحادي الطور

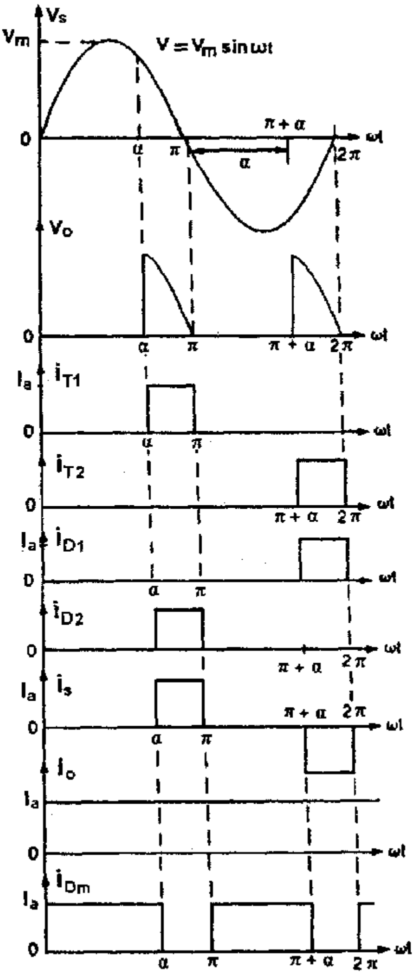
Single-Phase Semi converters

يتألف هذا المحول من الدائرة المبينة في الشكل (٤-٣٠)، الحمل في هذه الدائرة هو (RL) ذو قيمة كبيرة من اجل استمرار مرور التيار في الحمل .



الشكل (٤-٣٠)

مقوم محكوم نصفي أحادي الطور



الشكل (٤-٣١)

شكل إشارة الدخل والخرج لمقوم محكوم نصفي بحمل حثي مادي

شرح الدائرة:- خلال النصف الأول الموجب لموجة الدخل يكون الثايروستور (T_1) منحازاً انحيازاً أمامياً وعند قدح الثايوستور (T_1) بزاوية قدح $(\alpha = \omega t)$ فان الحمل يوصل مع جهد المدخل عبر الثايوستور (T_1) والديود (D_2) خلال الفترة $(\alpha \le \omega t \le \pi)$. وخلال الفترة بين $(\pi \le \omega t \le \alpha + \pi)$ يكون جهد المدخل سالب والديود (D_m)منحازاً انحيازاً أمامياً. وبالتالي يقوم الديود (D_m) بالتوصيل لتامين استمرار مرور التيار إلى الحمل.

وبالتالي يمر التيار إلى الحمل من خلال (D_m, D_2, T_1). وعند النصف السالب للموجة ويتحول الثايوستور (D_2, T_1) إلى حالة القطع.

خلال النصف السالب لموجة الدخل يكون الثايوستور (T_2) منحازاً أنحيازاً أمامياً وعندما يتم قدح الثايروستور (T_2) عند $(\omega t = \pi + \alpha)$ يكون الديود (D_m) منحازاً انحيازاً عكسياً. ويكون الحمل موصولا مع مصدر التغذية من خلال الثايوستور (T_2) والديود (D_1). ويعمل هذا المقوم المحكوم خلال الربع الأول حيث يكون الجهد والتيار موجبين وهذا المقوم المحكوم له معامل قدره محسن نتيجة لاستخدام الديود (D_m) ويستخدم في التطبيقات الصناعية لغاية $(15KW)$، حيث يكون العمل ضمن الربع الأول. شكل موجة الدخل وموجة الخرج لهذا المقوم مبينة في الشكل (٤-٣١).

القيمة المتوسطة لجهد الحمل تعطى بالعلاقة :-

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_m \ Sin\ \omega t \ \ d\omega\ t = \frac{2V_m}{2\pi}\left[-Cos\ \omega\ t\right]_{\alpha}^{\pi}$$

$$= \frac{V_m}{\pi}\left[1 + Cos\,\alpha\right] \qquad (4.41)$$

وهذه القيمة تتغير من ($\frac{2V_m}{\pi}$) إلى صفر عندما تتغير (α) من الصفر الى (π).

والقيمة العظمى للقيمة المتوسطة للجهد تعطى بالعلاقة التالية:-

$$V_{dm} = \frac{2V_m}{\pi} \qquad (4.42)$$

والجهد (V_n) (Normalized Average Output) يعطى بالعلاقة:-

$$V_n = \frac{V_{dc}}{V_{dm}} = 0.5\left(1 + Cos\,\alpha\right) \qquad (4-43)$$

القيمة الفعالة لجهد الخرج تعطى بالعلاقة :-

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_m^2\ Sin^2\omega\ t\ d(\omega\ t)} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi}(1 - Cos2\ \omega\ t)\,d(\omega\ t)}$$

$$= \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left[\pi - \alpha + \frac{Sin2\alpha}{2}\right]} \qquad (4.44)$$

مثــال(٤-٧):- مقوم محكوم أحادي الطور نصفي، على اعتبار أن زاويـــة قـدح الثايروستورات (T_2, T_1) هي $\left(\alpha = \frac{\pi}{2}\right)$. وعلى اعتبار أن الحمل مـادي بحـت

المطلوب حساب:-

١- المردود.   ٢- معامل الشكل.

٣- معامل التموج.   ٤- معامل الاستخدام.

٥- القيمة العظمى لجهد الانحياز العكسي للثايروستور (T_1).

إذا كانت القيمة الفعالة لجهد الدخل تساوي $(120\,V)$.

الحل :-

$$V_m = \sqrt{2} \times V_{rms} = 169.7V$$

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi}\left[1 + Cos\frac{\pi}{2}\right] = \frac{V_m}{\pi} = 0.3183\,V_m$$

$$= \frac{169.7}{\pi} = 54\,V$$

$$V_R = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left[\pi - \alpha + \frac{Sin\,2\alpha}{2}\right]}$$

$$= \frac{169.7}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left[\pi - \frac{\pi}{2} + \frac{Sin\,\pi}{2}\right]}$$

$$= 0.50006\,V_m = 84.85 \quad V$$

$$P_{dc} = \frac{V_m}{\pi} \times \frac{V_m}{\pi \times R} = \frac{V_m^2}{\pi^2 R} = \frac{(0.3183\,V_m)^2}{R}$$

$$P_{ac} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{0.5} \times \frac{V_m\sqrt{0.5}}{\sqrt{2} \times R} = \frac{(V_m/2)^2}{R} = \frac{(0.50006\,V_m)^2}{R}$$

المردود :-

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{\dfrac{V_m^2}{\pi^2 . R}}{\dfrac{V_m^2}{4 \times R}} = \frac{(0.3183)^2}{(0.50006)^2} = 0.404 = 40.4\ \%$$

معامل الشكل :-

$$F.F = \frac{V_R}{V_o} = \frac{\dfrac{V_m}{2}}{\dfrac{V_m}{\pi}} = \frac{\pi}{2} = 1.57 = 157\ \%$$

معامل التموج:-

$$RF = \sqrt{(F.F)^2 - 1} = 1.21 = 121\ \%$$

معامل الاستعمال:-

$$V_S = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$I_S = I_R = \frac{V_m}{2R}$$

$$S = P_{VA} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \times \frac{V_m}{2 \times R} = \frac{V_m^2}{2\sqrt{2}R}$$

$$TUF = \frac{P_{dc}}{P_{VA}} = \frac{\dfrac{V_m^2}{\pi^2 R}}{\dfrac{V_m^2}{2\sqrt{2}\,R}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2} = 0.2866$$

القيمة العظمى لجهد الانحياز العكسي للثايروستور :-

$$PIV = V_m$$

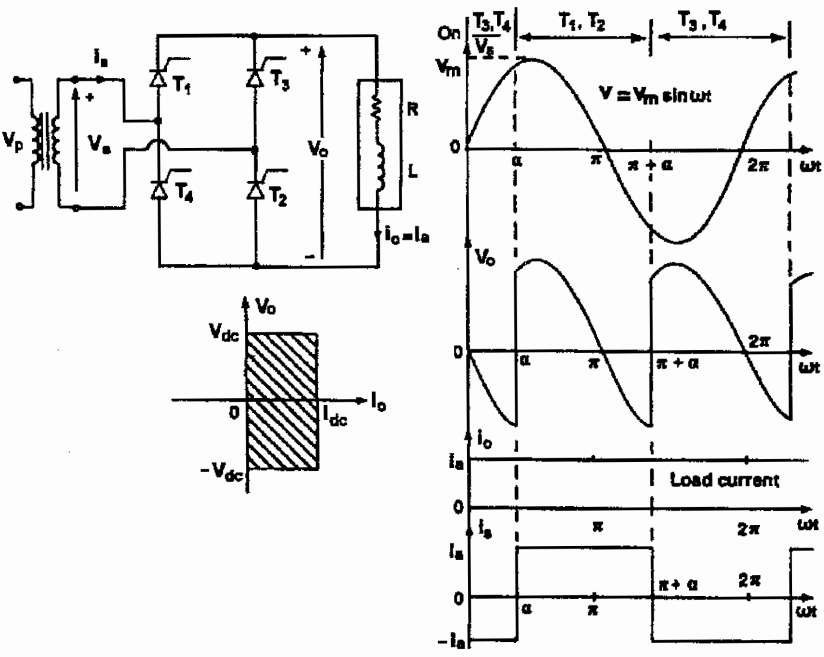
٤-١-٣- التقويم المحكوم أحادي الطور موجة كاملة :-

Single- phase Full Control Rectifier

هذه الدائرة تُغذى من مصدر جهد أحادي الطور وخرجها يكون عبارة عن نبضتين خلال دورة واحدة. يوجد نوعان من التقويم المحكوم موجة كاملة:-

١-تقويم أحادي الطور موجة كاملة جسري كما في الشكل (٤-٣٢).

Single-Phase Full-Wave Bridge Controlled Rectifier



الشكل (٤-٣٢)

الدائرة العملية لمقوم محكوم موجة كاملة-جسري

وشكل الموجات الخارجة في حالة حمل حثي مادي

مبدأ العمل:-

خلال النصف الموجب لموجة الدخل يكون الثايروستورين (T_1, T_2)، بانحياز أمامي وعندما يتم قدح هذين الثايروستورين بزاوية قدح $(\alpha = \omega t)$، فإن الحمل يكون موصولا مع منبع التغذية من خلال الثايروستورين (T_1, T_2). وإذا كان الحمل للدائرة هو حمل حثي فان الثايروستورين (T_1, T_2) سوف يستمران في التوصيل مع أن جهد المدخل سالباً. خلال النصف السالب لموجة الدخل يكون كل من الثايروستورين (T_3, T_4) بحالة انحياز أمامي وعند قدح هذين الثايروستورين سوف يطبق جهد المصدر على طرفي الثايروستورين (T_1, T_2) كجهد انحياز عكسي. الثايروستورين (T_2, T_1) سوف يتم تحويلهما إلى حالة الفصل باستخدام التبديل الطبيعي وتيار الحمل يتم تحويله من (T_2, T_1) إلى (T_3, T_4). خلال الفترة (α)حتى(π) يكون جهد وتيار المنبع موجبان، ويتم نقل القدرة من مصدر التغذية إلى الحمل ويقال عن المقوم في هذه الفترة بأنه يعمل في وضع التقويم. خلال الفترة من (π) الى $(\alpha + \pi)$ يكون جهد المصدر سالبا وتيار المصدر موجبا ويكون هنالك قدرة معكوسة من الحمل إلى المصدر ويقال عن المقوم في هذه الحالة انه يعمل في الوضع العكسي. يستخدم هذا المحول في التطبيقات الصناعية لغاية $(15KW)$. وحسب قيمة زاوية قدح الثايروستور (α) فان القيمة المتوسطة لجهد الحمل يمكن أن تكون موجبة أو سالبة ومنطقة العمل لهذا المقوم تكون ضمن مربعين.

القيمة المتوسطة لجهد الخرج في حالة كون الحمل الحثي:-

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} V_m \ Sin\,\omega\, t \, d\omega\, t$$

$$= \frac{2V_m}{2\pi} [-Cos\,\omega\, t]_{\alpha}^{\alpha+\pi} = \frac{2V_m}{\pi} Cos\,\alpha \qquad (4.45)$$

إذا كان الحمل حملا ماديا :-

$$V_o = \frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_m \ Sin\,\omega\ t\ d\omega\ t$$

$$= \frac{2V_m}{2\pi}\left[-Cos\ \omega\ t\right]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_m}{\pi}\left[1 + Cos\,\alpha\right] \qquad (4.46)$$

القيمة الفعالة لجهد الخرج في حال كون الحمل حثيا تعطى بالعلاقة :-

$$V_R = \sqrt{\frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\pi} V_m^2\ Sin^2\omega\ t\ d\omega\ t} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = V_S \qquad (4.47)$$

القيمة الفعالة لجهد الخرج في حال كون الحمل حملا ماديا تعطى بالعلاقة :-

$$V_R = \sqrt{\frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_m^2\ Sin^2\omega\ t\ d\omega\ t} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left[\pi - \alpha + \frac{Sin\,2\alpha}{2}\right]} \qquad (4.48)$$

مثال (٤-٨):- دائرة مقوم محكوم موجة كاملة أحادي الطور يحتوي على حمل حثي (RL) ويطبق على الملف الابتدائي للمحول جهد قيمته الفعالة $(120\,V)$ المطلوب حساب:-

القيمة المتوسطة والقيمة الفعالة لجهد الحمل لهذا المحول إذا كانت زاوية القدح المتزامنة للثايوستورات $\left(\alpha = \frac{\pi}{3}\right)$.

الحل : -

$$V_o = \frac{2V_m}{\pi}Cos\alpha = \frac{2\,V_m}{2\pi} = \frac{V_m}{\pi}$$

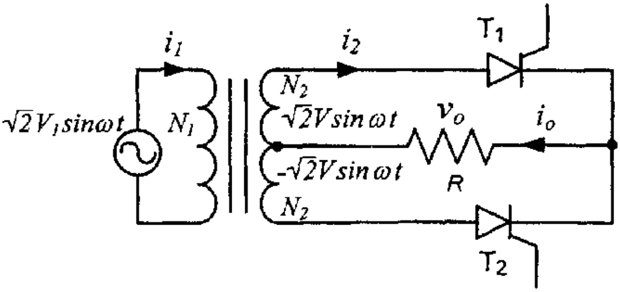
$$V_m = \sqrt{2}\,V_S = 120\times\sqrt{2} = 169.7V$$

$$V_o = 54.02V$$

$$V_R = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = V_S = 120\,V$$

٢- تقويم أحادي الطور موجة كاملة بمحول نصفي الشكل (٤-٣٣):-

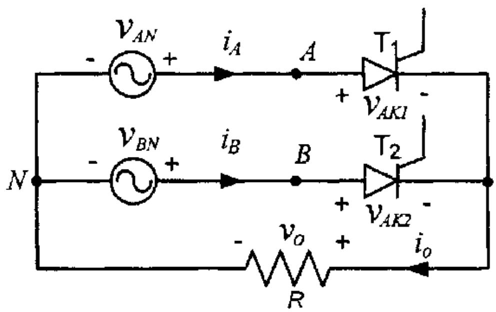
Single-Phase Full-Wave Center-tapped Controlled Rectifier



الشكل(٤-٣٣)

مقوم أحادي الطور موجة كاملة بمحول نصفي

في الدائرة المبينة الشكل (٤-٣٣) يكون جهد الانحياز العكسي المطبق على أحد الثايرستورات ضعف الجهد العكسي المطبق على أحدى الثايرستورات في الشكل (٤-٣٢). والدائرتان في الشكل (٤-٣٢) والشكل (٤-٣٣) يمكن تمثيلهما بدائرة مكافئة كما في الشكل (٤-٣٤).



الشكل (٤-٣٤)

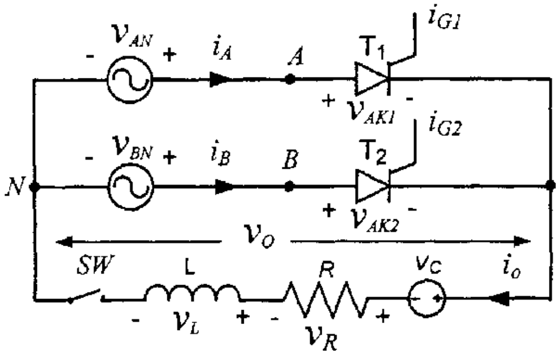
الدائرة الكهربائية المكافئة لمقوم محكوم نصفي

حيث أن:-

$$V_{AN} = V_m \, Sin\, \omega t$$
$$V_{BN} = V_m \, Sin(\omega t + \pi)$$
$$= -V_m \, Sin\, \omega t$$

٤-١-٣-١- دائرة تقويم أحادي الطور موجة كاملة بحمل حثي مادي مع مصدر جهد مستمر:-

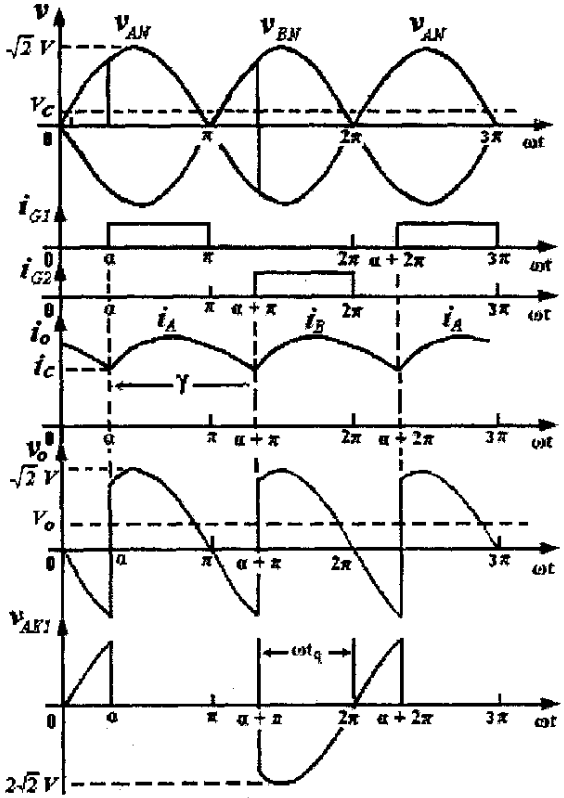
RL Load with Electromotive Force



الشكل (٤-٣٥)

دائرة تقويم أحادي الطور موجة كاملة بحمل حثي مادي مع مصدر جهد مستمر

الدائرة المبينة في الشكل (٤-٣٥)، إذا كان المفتاح (SW) مفتوحاً فإنه في هذه الحالة لن يمر تيار عبر الحمل. وعند إغلاق المفتاح (SW) وتطبيق أشارة قدح (α)، في هذه الحالة سيتحول الثايرستور (T_1) الى حالة التشغيل. أذا تم اختيار قيمة $(\alpha = 0)$ في هذه الحالة تكون الدائرة وكأنها دائرة تحكم غير محكوم، وتكون قيمة التيار المار في الحمل ذو قيمة عظمى. وإذا ما تم تطبيق إشارة تحكم على بوابة الثايرستور (T_1) عند $(\omega t = \alpha)$، فإنه لا بد من تطبيق إشارة تحكم على بداية الثايرستور (T_2) عند $(\omega t = \alpha + \pi)$ كما في الشكل (٤-٣٦).



الشكل (٤-٣٦)

إشارة الدخل والخرج والإشارة المتبقية على الثايرستور في حالة التيار متصل

الدائرة في الشكل (٤-٣٥) لها وضعيات عمل هي:-

١- الوضع الأول:- تكون قيمة تيار الحمل متصلاً (Continuous) وعندما تكون قيمة زاوية القدح قليلة.

٢- الوضع الثاني:- تكون قيمة تيار الحمل متقطعاً (Discontinuous) بمعنى غير متصل ويكون على شكل مجموعة من النبضات كل واحدة منها تستمر لفترة أقل

من $(\pi\ rad)$. ويتم احتساب القيمة الفعالة للتيار والقيمة المتوسطة للتيار عبر الحمل من خلال استخدام المنحنيات السابقة (علاقة كل من (I_N) و (I_{RN}) مع (α))، ولكن يجب الانتباه هنا الى أن القيمة المأخوذة من هذه المنحنيات هي لدائرة تقويم أحادي الطور موجة كاملة لذا فإن:-

$$(I_N)_{Full\ Wave} = 2(I_N)_{Half\ Wave}$$

$$(I_{RN})_{Full\ Wave} = \sqrt{2}\ (I_{RN})_{Half\ Wave}$$

في هذه الدائرة إذا كانت $(\gamma > \alpha)$، فإن الثايرستور (T_1) سوف يستمر في التوصيل لحين وجود إشارة تحكم على الثايرستور (T_2) عند الزمن $(\omega t = \alpha + \pi)$. فعند هذه اللحظة تكون قيمة الجهد $(V_{AN} < 0)$ بينما تكون قيمة $(V_{BN} > 0)$، وفي هذه الحالة يتحول التيار المار من خلال الحمل من تيار (i_A) الى تيار (i_B) ويكون التيار المار من خلال الحمل تياراً متصلاً. وفي هذه الحالة لا يمكن استخدام المنحنيات السابقة من أجل تحليل الدائرة. ويبين الشكل (٤-٣٧) مناطق العمل المتصل ومناطق العمل الغير متصل.

من أجل قيم لـ (α) و (m) حيث $\left(m = \frac{V_C}{V_m}\right)$ أذا كان $(m \geq 1)$ بمعنى $(V_C \geq V_m)$ فإنه في هذه الحالة لن يتحول أي ثايرستور للتوصيل (انحياز عكسي). ومن أجل قيم لـ (α) و (m)، أذا كانت $(m \leq -1)$ بمعنى $(V_C \leq -V_m)$ فإنه في هذه الحالة لن يتوقف أي ثايرستور عن التوصيل (لن يصل التيار في أي ثايرستور الى قيمة أقل من تيار الإمساك). وحيث أنه لا توجد لحظة يطبق فيها جهد انحياز عكسي على الثايرستورات، وفي هذه الحالة يمكن أن تحدث دائرة قصر بين الطورين. وبالتالي فإن مبدأ العمل لهذه الدائرة يكون عند $(m = -1)$ أو أكبر بقليل من هذه القيمة نتيجة زمن التأخير في توقف الثايرستور. وبالتالي يمكن الحصول على مجموعة من المنحنيات السابقة من أجل قيم مختلفة للزاوية (ϕ). ومن أجل قيم

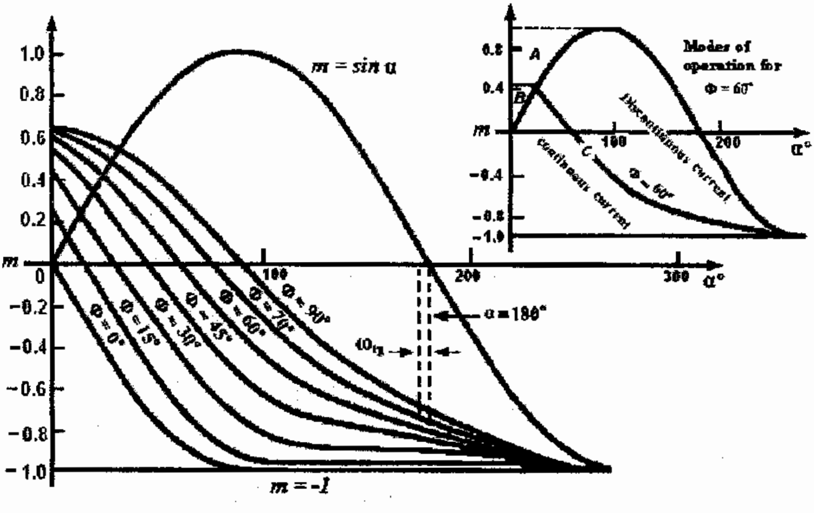
مختارة من (ϕ , α)، فإن هذه المنحنيات تحدد قيم (m) التي يمكن أن يكون العمل فيها متصل أو منفصل. عندما تصبح قيمة (m) سالبة فإنه يمكن الحصول على هذه المنحنيات من علاقات التيار (I_N) عند العمل الغير متصل للتيارات من العلاقة:-

$$\frac{Z}{V_m} i_o = Sin(\omega t - \phi) - \left[\frac{m}{Cos\phi} - \left[\frac{m}{Cos\phi} - Sin(\alpha - \phi) \right] e^{\frac{(\alpha - \omega t)}{\tan\phi}} \right]$$

$$\alpha < \omega t < \alpha + \gamma \qquad (4.49)$$

حيث أن:

$$m = \frac{V_C}{V_m} \qquad , \qquad \zeta = Sin^{-1} m$$



الشكل (٤-٣٧)

مناطق العمل المتصل ومناطق الغير متصل للتيار

طريقة تحديد فيما إذا كان العمل ضمن منطقة التيار المتصل أو المنفصل:-

١- من أجل أي نقطة (m , α) ضمن المنطقة (A) يكون العمل غير متصل كما في الشكل (٤-٣٧)، حيث أن الثايرستور يتحول الى حالة التوصيل عند $(\omega t = Sin^{-1}m = \zeta)$، وبالتالي أذا كانت $(\omega t < \zeta)$ فإنه يكون هنالك جهد انحياز عكسي مطبق على الثايرستور (T_1)، حيث أن $(V_C = v_{AN})$.

٢- وعند أي نقطة (m , α) ضمن المنطقة (B) يكون التيار عبر الحمل متصلاً، حيث أن الثايرستور يتحول الى حالة التوصيل عند $(\omega t = \alpha \leq Sin^{-1}m)$، وعندها فإن أي تحويل لأحد الثايرستورات الى حالة التوصيل سوف يؤدي الى توقف الأخر عن التوصيل.

٣- من أجل أي نقطة (m , α) على الخط (C) أي عند $(m = -1)$ فإن أي ثايرستور سيتحول الى حالة التوصيل عند $(\omega t = \alpha)$ بغض النظر عن كون التيار متصلاً أو منفصلاً.

٤- على يسار الحد الفاصل بـ $(\alpha = 180^o)$ يعمل المحول بشكل مستقر ضمن المجال $(0 \geq m \geq -1)$، إن كان التيار متصلاً أو منفصلاً.

٥- على يمين الحد الفاصل سوف يعمل المحول بشكل مستقر فقط بتيار غير متصل ويمكن توضيح ذلك كما يلي:-

أذا كانت الزاوية $(\alpha < 180^o)$ فإن $(v_{AN} > 0)$ و $(V_{BN} < 0)$، وبالتالي من الحلقة المشُكلة لكلا الثايرستورين يكون:-

$$v_{AN} - v_{BN} + v_{AK2} - v_{AK1} = 0$$

وبما أن الثايرستور الأول (T_1) في حالة توصيل. فإن $(V_{AK1} = 0)$ وأن:-

$$v_{AK2} = v_{BN} - v_{AN} < 0 \qquad , \quad 0 < \alpha < 180^o$$

وبما أن الثايرستور (T_2) سوف يتوقف عن العمل. أذاً تم تطبيق أشارة تحكم على الثايرستور الأول $(\alpha > 180^o)$ وبهذه الحالة تكون $(v_{AK2} > 0)$ ويستمر الثايرستور (T_2) بالتوصيل ويحدث دائرة قصر في هذه الدائرة. وبالتالي فأنه من أجل أي حمل لهذه الدائرة عند $(\alpha < 180^o)$، وكانت النقطة (α , m) تقع أسفل منحنى قيمة (ϕ)، فإن العمل لهذه النقطة غير مسموح.

الربع الأول من الشكل (٤-٣٧) يمثل عمل الدارة كمقوم، حيث أن الجهد (V_C) يأخذ قدرة من مصدر الجهد للمصدر. بينما ضمن الربع الرابع فإن مصدر الجهد (V_C) يعطي طاقة وهنا يوجد احتمالين:-

الاحتمال الأول:- إذا كانت الدائرة بشكل كامل تعطي قدرة الى مصدر الجهد المتناوب، أي أن هنالك إعادة للفولطية ناتجة عن الحمل. أي أن النظام يعمل في هذه الحالة كعاكس من جهد مستمر (dc) الى جهد متناوب (Ac) ثابت التردد.

الاحتمال الثاني:- إذا كانت الدائرة تستمد قدرتها بشكل كامل، أي بمعنى أن جهد المصدر المتناوب وجهد المصدر المستمر يعطيان قدرة الى الحمل، فإنه في هذه الحالة تكون الدائرة عند الحد الفاصل بين المقوم والعاكس. فإذا كان التيار في هذه الحالة متصلاً في الربع الرابع فيمكن التميز بين العمل كمقوم أو العمل كعاكس. فإذا كانت $\left(\alpha > \frac{\pi}{2}\right)$ و $(m < 0)$ فإن جهد المخرج (V_o) يصبح سالباً. وبالتالي فإنه في هذه الحالة تعمل الدائرة كعاكس. بينما أذا كانت $\left(0 < \alpha < \frac{\pi}{2}\right)$ و $(m = 0)$ فإن جهد المخرج (V_o) يصبح موجباً. وبالتالي فإن الحمل يستمد قدرته من مصدر التيار المتناوب ومصدر الجهد المستمر الشكل (٤-٣٧). وفي حالة العمل في الربع الرابع وكون التيار غير متصل، فإن جهد المخرج (V_o) يتكون من ثلاثة أجزاء:-

$$v_o = V_C \quad , \quad i_o = 0$$

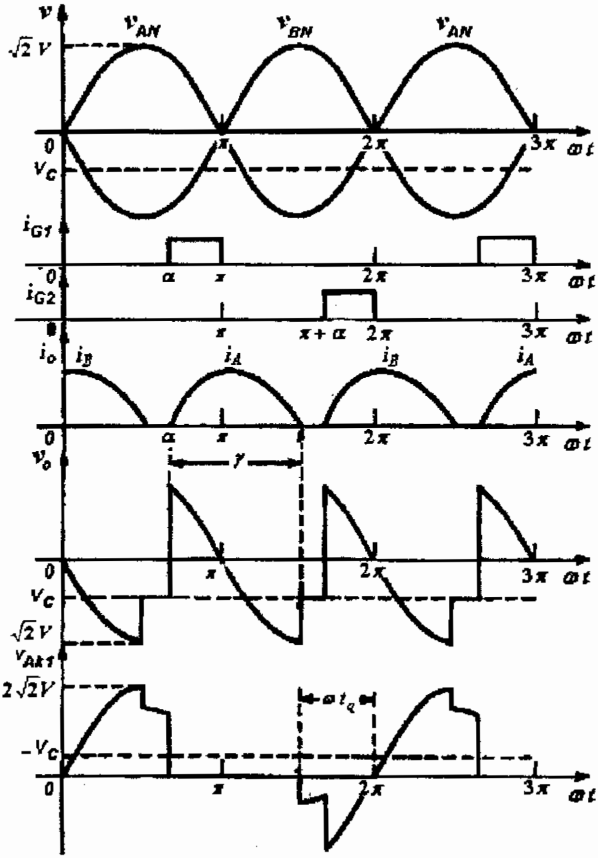
$$v_o = v_{AN} \quad , \quad i_o = i_A \neq 0$$

$$v_o = v_{BN} \quad , \quad i_o = i_B \neq 0$$

وبالتالي فإن القدرة المزودة للحمل تعطى بالعلاقة:-

$$P_o = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} v_o \ i_o \ d(\omega t) \qquad (4.50)$$

فإذا كانت هذه القدرة $(P_o < 0)$ فإن النظام يكون عاكساً. وإذا كانت هـــذه القـــدرة $(P_o > 0)$ فإن النظام يكون في وضع متوسط بين العاكس والمقوم الشكل (٤-٣٨) يبين إشارة المدخل وإشارات المخرج في حال كون التيار غير متصل.



الشكل (٤-٣٨) إشارة الدخل وإشارات الخرج في حال التيار غير متصل

من الشكل (٤-٣٦) عندما يكون التيار متصلاً عبر الحمل ، فإن الجهد (v_o) حسب تحليل فورير يعطى بالعلاقة:-

$$v_o = V_o + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \; Cos\left(n\omega t - \theta_n\right) \qquad (4.51)$$

حيث أن:- (V_o) تمثل القيمة المتوسطة لجهد الخرج وتعطى بالعلاقة:-

$$V_o = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\pi} V_m \; Sin\omega t \; d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} Cos\alpha \qquad (4.52)$$

والحد:-

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \qquad (4.53)$$

$$\theta_n = \tan^{-1}\frac{a_n}{b_n} \qquad (4.54)$$

$$a_n = \frac{2}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\pi} v_o \; Sin\, n\omega t \; d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi}\left[\frac{Sin(n+1)\,\alpha}{(n+1)} - \frac{Sin(n-1)\,\alpha}{(n-1)}\right] \quad (4.55)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\pi} v_o \; Cos\, n\omega t \; d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi}\left[\frac{Cos(n+1)\alpha}{(n+1)} - \frac{Cos(n-1)\alpha}{(n-1)}\right] \quad (4.56)$$

من هذه الدائرة يمكن ملاحظة أن تردد موجة الخرج يساوي ضعف تردد موجة الدخل ، وهذا يعني أن توافقيات موجة الخرج تساوي $(n = 2m)$، حيث أن (m) عدد صحيح. أي أن التوافقيات للخرج هي توافقيات زوجية وليس هنالك توافقيات فردية.

القيمة الفعالة لجهد الخرج تعطى بالعلاقة:-

$$V_R = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\pi} (V_m \; Sin\omega t)^2 \; d(\omega t)} = \frac{2V_m}{\pi} Cos\alpha \qquad (4.57)$$

جهد التموج (The ripple voltage) يعطى بالعلاقة:-

$$V_{RI} = \sqrt{V_R^2 - V_o^2} = V\sqrt{1 - \frac{8Cos^2\alpha}{\pi^2}} \quad (4.58)$$

ومعامل تموج الجهد (The voltage ripple factor):-

$$K_v = \frac{V_{RI}}{V_o} \quad (4.59)$$

والتيار في هذه الدائرة وحسب تحليل فورير يعطى بالعلاقة:-

$$i_o = I_o + \sum_{n=1}^{\infty} d_n \; Cos(n\omega t - \theta_n - \phi_n) \quad (4.60)$$

حيث أن:-

$$d_n = \frac{C_n}{\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \quad (4.62)$$

$$I_o = \frac{V_o - V_C}{R} \quad (4.61)$$

$$\phi_n = \tan^{-1}\frac{n\omega L}{R} \quad (4.63)$$

والقيمة الفعالة للتيار من أجل أي توافقية تساوي:-

$$I_{nR} = \frac{d_n}{\sqrt{2}} \quad (4.64)$$

تيار التموج (Ripple Current) يعطى بالعلاقة:-

$$I_{RI} = \sqrt{\sum I_{nR}^2} \quad (4.65)$$

وهذه القيمة يمكن أن تحسب لأي عدد من التوافقيات، والقيمة الفعالة لتيار المخرج تعطى بالعلاقة:-

$$I_R = \sqrt{{I_o}^2 + I_{RI}^2} \quad (4.66)$$

ومعامل التموج للتيار (Ripple current factor) يعطى بالعلاقة:-

$$K_i = \frac{I_{RI}}{I_o} \qquad (4.67)$$

والقيمة المتوسطة للتيار المار خلال الثايرستور يعطى بالعلاقة:-

$$I_{QR} = \frac{I_o}{2} \qquad (4.68)$$

والقيمة الفعالة للتيار المار خلال الثايرستور يعطى بالعلاقة:-

$$I_{QR} = \frac{I_o}{\sqrt{2}} \qquad (4.69)$$

والزمن اللازم لإطفاء الثايرستور والذي يجب أن يتجاوز زمن التوقف (t_{off}) للثايرستور يعطى بالعلاقة:-

$$t_q = \frac{\pi - \alpha}{\omega} \qquad [s]$$

وعندما يتم توصيل الثايرستور (T_2) في الدائرة، فإنه في هذه الحالة يكون $(V_{AK2} = 0)$، وبالتالي من الجهود في الحلقة يمكن كتابة العلاقة التالية:-

$$v_{AN} - v_{BN} + v_{AK2} - v_{AK1} = 0$$

ويكون:-

$$v_{AK1} = v_{AN} - v_{BN}$$

وتكون القيمة العظمى لهذا الجهد في حالة استخدام مقوم محكوم أحادي الطور جسري (Bridge) موجة كاملة مساوية:-

$$v_{AK1\max} = \pm \; V_m$$

وتكون قيمة هذا الجهد في حالة استخدام مقوم محكوم أحادي الطور ذو المحول النصفي (Center-tapped) موجة كاملة مساوية:-

$$v_{AK1\max} = \pm \; 2V_m$$

مقارنة بين استخدام دائرة مقوم جسري ودائرة مقوم بمحول نصفي:-

في حالة استخدام المقوم ألجسري يمكن استخدام محول في دائرة الدخل يعمل كمحول عزل بنسبة تحويل $(1:1)$. ويمكن استخدام مصدر جهد متناوب بشكل مباشر مطبق على دائرة التقويم، في حالة عدم الحاجة لعزل دائرة الدخل عن دائرة التقويم. بينما عند استخدام دائرة تقويم أحادي الطور بمحول نصفي، فإنه لا بد من وجود محول يكون عدد لفات ملف الثانوي تساوي ضعف عدد لفات الملف الابتدائي. فمن أجل دائرة المقوم ألجسري فإن تيار الملف الثانوي للمحول يكون مساوياً للقيمة الفعالة لتيار الحمل $(I_2 = I_R)$ والقدرة الظاهرية في الملف الثانوي للمحول تساوي:-

$$S_2 = V \cdot I_R \qquad (4.70)$$

فإذا كانت نسبة التحويل للمحول تعطى بالعلاقة:-

$$n = \frac{N_1}{N_2}$$

حيث أن:-

N_1 : عدد لفات الملف الابتدائي　　　　N_2 : عدد لفات الملف الثانوي

فإن القدرة في الملف الابتدائي تعطى بالعلاقة:-

$$S_1 = n \cdot V \frac{I_R}{n} = V \cdot I_R = S_2$$

بينما في دارة التقويم بوجود محول نصفي، فإن القيمة الفعالة لتيار ثانوي المحول تساوي القيمة الفعالة للتيار المار من خلال الثايرستور وتساوي:-

$$I_2 = I_{QR} = \frac{I_R}{\sqrt{2}}$$

وبالتالي فأن القدرة الظاهرية لثانوي المحول تساوي:-

$$S_2 = 2 \cdot V\, I_{QR} = \sqrt{2}\; V_R\, I_R$$

وتكون نسبة التحويل للمحول المستخدم تعطى بالعلاقة:-

$$n=\frac{N_1}{N_2}=\frac{1}{2}$$

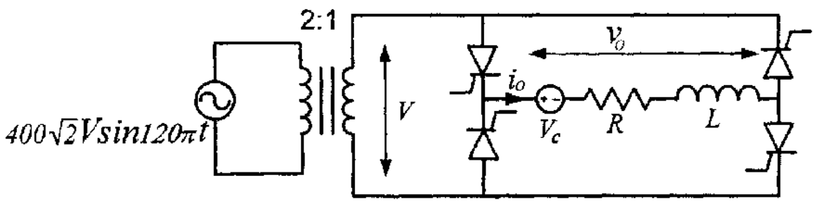
وبالتالي فإن القدرة في الملف الابتدائي تعطى بالعلاقة:-

$$S_1=n\,.V\frac{I_R}{n}=V\,.\,I_R$$

نجد أننا بحاجة الى قدرة أكبر للمحول المستخدم في دائرة المحول النصفي (Center-tapped).

مثال (٤-٩):- لدائرة التقويم المحكوم أحادي الطور المبينة في الشكل (٤-٣٩):- المطلوب حساب القيمة الفعالة والقيمة المتوسطة لتيار الحمل والقيمة الفعالة والقيمة المتوسطة لتيار الثايرستور ومعامل القدرة لمصدر التغذية. حيث أن:-

$$L=20mH \quad , \quad R=4.35\Omega \quad , \quad V_C=0 \quad , \alpha=75^o$$



الشكل (٤-٣٩)

القيمة المتوسطة لتيار الحمل:-

$$\phi=\tan^{-1}\frac{\omega L}{R}=\tan^{-1}\frac{120\pi\times 20\times 10^{-3}}{4.35}=60^o$$

$$m=\frac{V_C}{V_m}=0$$

من الشكل (٤-٣٧) نجد أن النقطة $(\alpha = 75^o \;, m = 0)$ تكون ضمن منطقة التيار الغير متصل. وبالتالي يمكن استخدام المنحنيات التي تربط بين $(\alpha \;, I_{RN} \;, I_N)$ من أجل قيمة $(\phi = 60^o)$. ومن هذه المنحنيات نجد أن:- $(I_N = 0.25)$ و $(I_{RN} = 0.42)$ وقيمة (I_{Base}) تحسب من العلاقة:-

$$I_{Base} = \frac{V_m}{Z}$$

نسبة التحويل للمحول هي $(2:1)$، وبالتالي فإن القيمة الفعالة لجهد الملف الثانوي تساوي:-

$$\frac{460}{2} = 230$$

$$I_{Base} = \frac{\sqrt{2} \times 230}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{\sqrt{2} \times 230}{\sqrt{4.35^2 + (7.54)^2}} = 37.7 \; A$$

بما أن الدائرة دائرة تقويم بموجتين على المخرج، فإن قيم (I_N) يجب أن تضرب بـ (2). وقيم (I_{RN}) يجب أن تضرب $(\sqrt{2})$.

$$I_o = 2 \times I_N \times I_{Base} = 2 \times 0.25 \times 37.7 = 18.9 \; A$$

القيمة الفعالة لتيار الحمل:-

$$I_R = \sqrt{2} \times I_{RN} \times I_{Base} = \sqrt{2} \times 0.42 \times 37.7 = 22.4 \; A$$

القيمة المتوسطة والقيمة الفعالة لتيار الثايرستور:-

أ- القيمة المتوسطة لتيار الثايرستور:-

$$I_Q = \frac{I_o}{2} = \frac{`18.9}{2} = 9.45 \; A$$

ب- القيمة الفعالة لتيار الثايرستور:-

$$I_{QR} = \frac{I_R}{\sqrt{2}} = \frac{`22.4}{\sqrt{2}} = 15.8 \; A$$

معامل القدرة لمصدر التغذية:-

$$PF = \frac{P_L}{S} = \frac{R_L \times I_R^2}{V_{rms} \times I_R} = \frac{4.35 \times (22.4)^2}{230 \times 22.4} = \frac{2180}{5150} = 0.423$$

مثال (٤-١٠):- من أجل المقوم والحمل ا في الشكل (٤-٣٩) أذا كانت:-

$$L = 40mH \quad , \quad R = 4\Omega \quad , \quad V_C = 80\ V \quad , \quad \alpha = 30^o$$

المطلوب حساب القيمة الفعالة والقيمة المتوسطة لتيار الحمل والقيمة الفعالة والقيمة المتوسطة لتيار الثايرستور ومعامل القدرة لمصدر التغذية.

الحل:- القيمة المتوسطة لتيار الحمل:-

لهذه الدائرة تكون قيمة $(V_S = 230\ V)$.

$$\phi = \tan^{-1}\frac{\omega L}{R} = \tan^{-1}\frac{15.1}{4} = 75^o$$

$$m = \frac{V_C}{V_m} = \frac{80}{\sqrt{2} \times 230} = 0.25$$

من خلال الشكل (٤-٣٧) نجد أن النقطة $(\alpha = 30^o\ , m = 0.25)$ تكون ضمن منطقة التيار المتصل. وبالتالي في هذه الحالة لا يمكن استخدام المنحنيات التي تربط بين $(\alpha\ , I_{RN}\ , I_N)$ من أجل قيمة مختلفة لـ (ϕ).

ومن العلاقة:-

$$V_o = \frac{2V_m}{\pi} Cos\alpha = \frac{2 \times \sqrt{2} \times 230}{\pi} Cos30 = 179\ V$$

$$I_o = \frac{V_o - V_C}{R} = \frac{179 - 80}{4} = 24.8\ \ A$$

القيمة الفعالة لتيار الحمل:-

يتم احتساب هذه القيمة باستخدام تحليل فورير ولكن يجب أن نحدد الرقم (بمعنى كم عدد التوافقيات المطلوب أخذها بالحساب).

$$i_o = I_o + \sum_{n=1}^{\infty} d_n \ Cos\left(n\omega t - \theta_n - \phi_n\right)$$

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\theta_n = \tan^{-1}\frac{a_n}{b_n}$$

$$a_n = \frac{2V_m}{\pi}\left[\frac{Sin(n+1)\alpha}{(n+1)} - \frac{Sin(n-1)\alpha}{(n-1)}\right]$$

$$b_n = \frac{2V_m}{\pi}\left[\frac{Cos(n+1)\alpha}{(n+1)} - \frac{Cos(n-1)\alpha}{(n-1)}\right]$$

$$\phi_n = \tan^{-1}\frac{n\omega L}{R}$$

أذا آخذنا هذه العلاقات من أجل التوافق التالي $(n = 2)$ نحصل على:-

من حساب قيم $(a_n \ ,b_n)$ يمكن حساب قيمة (C_n) حيث تساوي:-

$$C_n = 91$$

$$d_n = \frac{C_n}{\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} = \frac{91}{\sqrt{4^2 + (2\times 15.1)^2}} = 2.83 \quad A$$

وبالتالي فإنه يمكن إيجاد القيمة الفعالة للتيار الموافق للتوافقية الثانية وتساوي:-

$$I_{nR} = \frac{d_n}{\sqrt{n}} \Rightarrow I_{2R} = \frac{2.83}{\sqrt{2}} = 2 \ A$$

وهي قيمة قليلة بالمقارنة مع القيمة المتوسطة للتيار، وبالتالي يمكن إهمال القيم الفعالة للتوافقيات الأعلى:-

$$I_R = \sqrt{{I_o}^2 + I_{nR}^2} = \sqrt{(24.8)^2 + I_{2R}^2} = \sqrt{(24.8)^2 + (2)^2} = 24.8$$

القدرة المزودة للمصدر (V_C) تساوي:-

$$P_C = I_o.V_C = 80\times 24.8 = 1980 \ watt$$

القدرة المزودة للحمل (R) تساوي:-

$$P_R = I_R^2.R = 24.8^2 \times 4 = 2460 \, watt$$

وبالتالي تكون القدرة المزودة للحمل هي:-

$$P_{Load} = P_R + P_C = 2460 + 1980 = 4440 \ watt$$

معامل القدرة لمصدر التغذية:-

$$PF = \frac{P_L}{S} = \frac{4440}{V_{rms} \times I_R} = \frac{4440}{230 \times 24.8} = \frac{4440}{5700} = 0.78$$

مثال (٤-١١):- من أجل الدائرة والحمل المبينة في الشكل (٤-٣٩) أذا كانت:-

$$L = 40mH \quad , \quad R = 4\Omega \quad , \quad V_C = -80\,V \quad , \quad \alpha = 30^o$$

المطلوب حساب القيمة الفعالة والقيمة المتوسطة لتيار الحمل والقيمة الفعالة والقيمة المتوسطة لتيار الثايرستور ومعامل القدرة لمصدر التغذية.

القيمة المتوسطة لتيار الحمل:-

$$\phi = \tan^{-1}\frac{\omega L}{R} = \tan^{-1}\frac{15.1}{4} = 75^o$$

$$m = \frac{V_C}{V_m} = \frac{-80}{\sqrt{2} \times 230} = -0.25$$

من خلال الشكل (٤-٣٧) نجد أن النقطـــة $(\alpha = 30^o \ , m = 0.25)$ تكـــون ضـــمن منطقة التيار المتصل. وبالتالي في هذه الحالة لا يمكن استخدام المنحنيـــات التـــي تربط بين $(\alpha \ , I_{RN} \ , I_N)$ من أجل قيمة مختلفة (ϕ).

ومن العلاقة:-

$$V_o = \frac{2V_m}{\pi} Cos\alpha = \frac{2 \times \sqrt{2} \times 230}{\pi} Cos30 = 179 \ V$$

$$I_o = \frac{V_o - V_C}{R} = \frac{179 - (-80)}{4} = 64.8 \ A$$

القيمة الفعالة لتيار الحمل:-

$$I_R = \sqrt{{I_o}^2 + I_{nR}^2} = \sqrt{(64.8)^2 + I_{2R}^2} = \sqrt{(64.8)^2 + (2)^2} = 64.8 \ A$$

وهي قيمة قليلة بالمقارنة مع القيمة المتوسطة للتيار، وبالتالي يمكن إهمـــال القـــيم الفعالة للتوافقيات الأعلى:-

$$I_R \cong I_o = 64.8\ A$$

القدرة المزودة للمصدر (V_C) تساوي:-

$$P_C = I_o.V_C = 80 \times 64.8 = 5180\ watt$$

القدرة المزودة للحمل (R) تساوي:-

$$P_R = I_R^2.R = 64.8^2 \times 4 = 16800\ watt$$

وبالتالي تكون القدرة المزودة للحمل هي:-

$$P_{Load} = P_R - P_C = 16800 - 5180 = 11600\ watt$$

معامل القدرة لمصدر التغذية:-

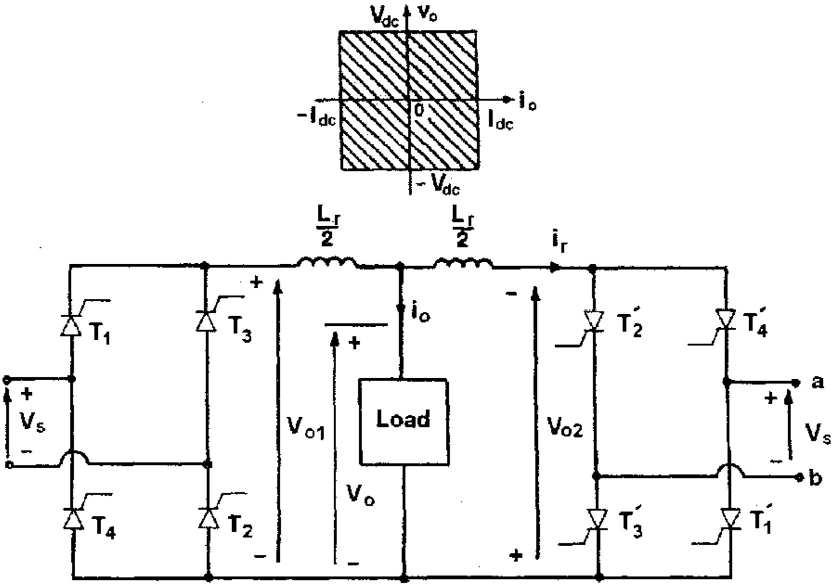
$$PF = \frac{P_L}{S} = \frac{11600}{V_{rms} \times I_R} = \frac{11600}{230 \times 64.8} = \frac{11600}{14900} = 0.778$$

٤-١-٤- المقوم المحكوم المضاعف أحادى الطور

Single-phase Dual Converter

إذا تم وصل مقومين محكومين موجة كاملة أحادية الطور مع بعضها بشكل متعاكس يمكن الحصول على مقوم محكوم مضاعف أحادى الطور. كما هو موضح بالشكل (٤-٤٠). ويبين الشكل (٤-٤١) شكل موجة الدخل وموجة الخرج لكـــلا المقومين وموجة التيار المار من خلال الحمل. وفي هذه يتم عكس كل من جهود وتيار المخرج، ويقوم النظام في العمل ضمن المربعات الأربعة للعمل. وتـــستخدم هذه المحولات في التحكم بسرعات المحركات ذات القدرات العالية. إذا كانت زاوية القدح لكل من ثايروستورات المحولين هي (α_2, α_1) علـــى الترتيـــب فانـــه يـــتم الحصول على القيمة المتوسطة لكل من جهـــدي المخـــرجين (V_{dc2}, V_{dc1}). ويـــتم

ترتيب زوايا القدح بحيث يعمل احد المقومين كمقوم ويعمل الآخر كعاكس، ولكـــن كلا المقومين يعطي نفس القيمة المتوسطة لجهد الخرج.



الشكل (٤-٤٠)

دائرة مقوم محكوم مضاعف أحادى الطور

من المعادلات الخاصة بالمقومات موجة كاملة، فإن القيمة المتوسطة لجهد الخرج:-

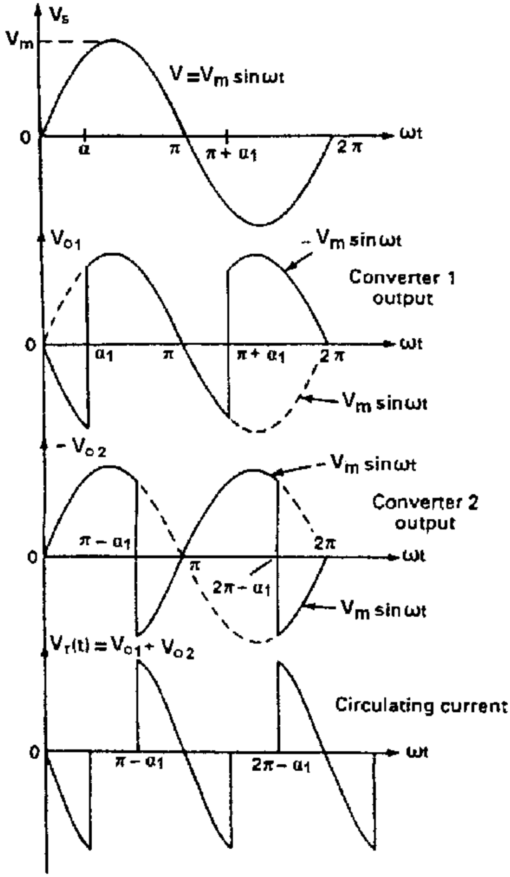
$$V_{dc1} = \frac{2V_m}{\pi} Cos\alpha_1 \qquad (4-72)$$

$$V_{dc2} = \frac{2V_m}{\pi} Cos\alpha_2 \qquad (4-73)$$

بما أن المقوم المحكوم الأول يعمل كمقوم والمقوم المحكوم الثاني يعمـــل كعـــاكس فان:-

$$V_{dc1} = -V_{dc2} \Rightarrow Cos\alpha_2 = -Cos\alpha_1 = Cos(\pi - \alpha_1)$$

$$\alpha_2 = \pi - \alpha_1 \qquad (4.74)$$

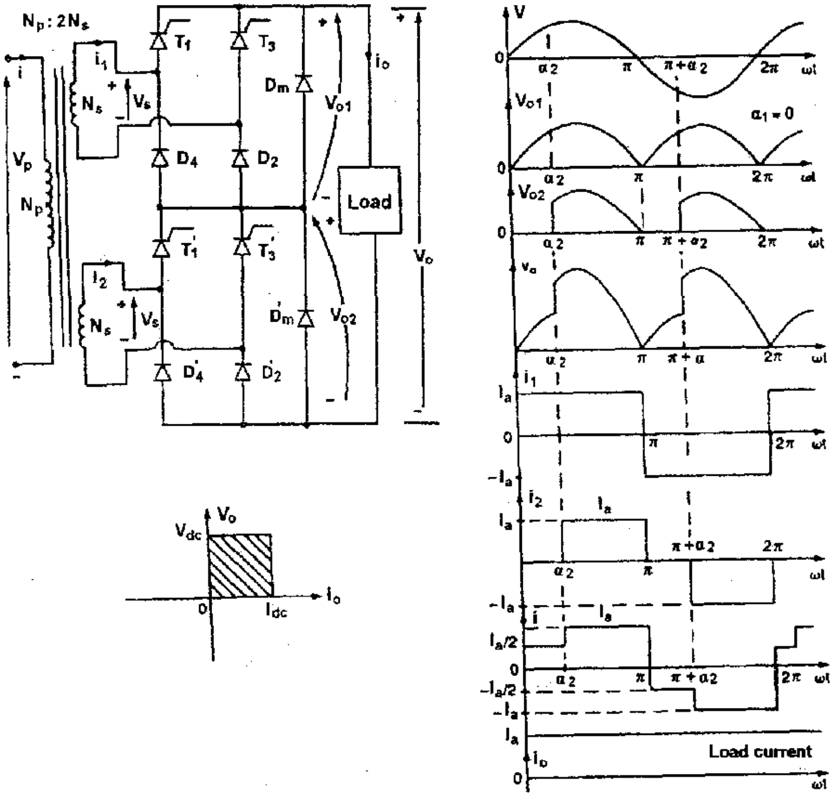


الشكل (٤-٤١)

شكل موجة الدخل وموجة الخرج لكلا المقومين

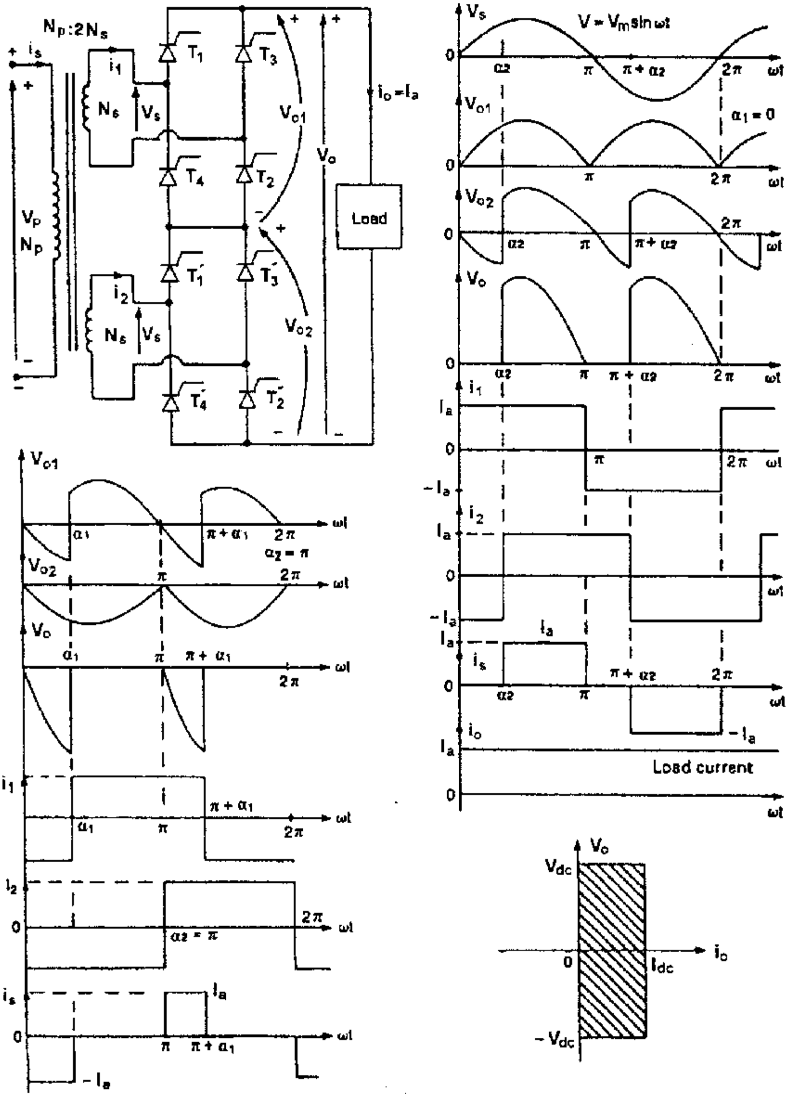
والملف (L_r) يمنع التيارات الدوارة من المرور عبر الحمل وهي ناتجة عن فرق الطور بين مخرجي المقومين المحكومين. ومن اجل الحصول على جهد تقويم مرتفع يمكن وصل مقوم محكوم أو أكثر على التوالي مع بعضهما البعض ويؤدي

ذلك إلى تحسين معامل القدرة للحمل. كما هو مبين في الشكل (٤-٤٢) والـشكل (٤-٤٣).



الشكل (٤-٤٢)

مقومات مضاعفات موجة كاملة نصفي موصولين على التوالي



الشكل (٤-٤٣)

مقومات مضاعفات موجة كاملة موصولين على التوالي

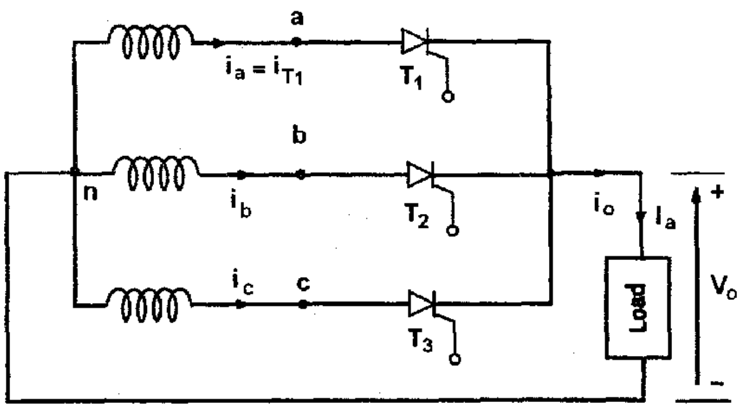
٤-٢- التقويم المحكوم ثلاثي الطور باستخدام الثايرستور:-

Three Phase Rectifiers by Using Thyristor

٤-٢-١- التقويم المحكوم ثلاثي الطور نصف موجة :-

Three- phase Rectifiers half- wave Converter

المقومات المحكومة ثلاثية الطور تعطي قيمة أكبر للقيمة المتوسطة لجهد الحمل، وتعمل على تحسين معامل التموج مقارنة مع المقومات المحكومة أحادية الطور. وتستخدم المقومات المحكومة ثلاثية الطور في التحكم بسرعات المحركات ذات القدرات العالية. والشكل (٤-٤٤) يبين دائرة مقوم محكوم ثلاثي الطور نصف موجة.



الشكل (٤-٤٤)

دائرة مقوم محكوم ثلاثي الطور نصف موجة

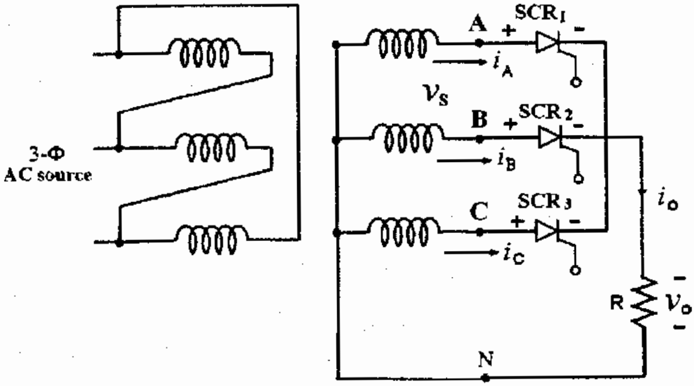
وعندما يتم قدح الثايوستور (T_1) بزاوية قدح $\left(\omega t = \frac{\pi}{6} + \alpha\right)$ فان جهد الطور (v_{an}) يظهر على طرفي الحمل حتى يتم قدح الثايروستور (T_2) بزاوية قدح $\left(\omega t = \frac{5\pi}{6} + \alpha\right)$. وعندما يتم قدح (T_2) فان الثايروستور (T_1) يتحول إلى

حالة الفصل لان جهد الخط $\left(v_{ab}=v_{an}-v_{bn}\right)$ يكـون جهـداً سـالباً أي يتحـول الثايروستور $\left(T_1\right)$ إلى حالة الانحياز العكسي. ويظهر الجهد $\left(v_{bn}\right)$ خلال الحمـل حتى يتم قدح الثايروستور $\left(T_3\right)$ بزاوية قدح $\left(\omega t=\frac{3\pi}{2}+\alpha\right)$ وعنـدما يتحـول الثايروستور $\left(T_3\right)$ إلى حالة التوصيل فان الثايروستور $\left(T_2\right)$ يكون في حالة انحياز عكسي مما يؤدي إلى إطفاءه، ويظهر الجهد $\left(v_{cn}\right)$ عبر الحمل حتـى يـتم قـدح الثايروستور $\left(T_1\right)$ مرة أخرى في بداية الموجة التالية .

ويتم تحديد شكل الموجة على أطراف الحمل في هذا النوع من المقومات المحكومة تبعاً لطبيعة الحمل .

يبين الشكل (٤-٤٥) الدائرة الكهربائية لمقوم محكوم ثلاثي الطور نصف موجة بحمل مادي. في هذه الحالة يتم قدح الثايرستورات بزوايـا قـدح مزاحـة $\left(120^\circ\right)$ لكل طور من الأطوار الثلاثة. وتعتمد فترة التوصيل لكل ثايرستور علـى مقدار زاوية القدح، ويتم احتساب زاوية القدح من الزاويـة $\left(30^\circ\right)$ وهـي نقطـة تقاطع جهود الطور $\left(V_{AN}\right)$ مع $\left(V_{CN}\right)$ وليس من نقطة الصفر للمحاور. ويـستمر كل ثايرستور من الثايروستورات بالتوصيل لفترة $\left(120^\circ\right)$ خلال كل دورة للموجة المقومة. قيمة جهد المقوم والظاهر على إطراف الحمل في حال كون الحمل لهـذا المقوم المحكوم حملاً مادياً يعتمد على قيمة زاوية القدح (α)، في هذه الحالة تكون هنالك قيم حدية لهذه الزاوية وهي:-

أ- عندما $\left(\alpha=0^\circ\right)$:- في هذه الحالة تصبح الدائرة دائرة مقوم غير محكوم ثلاثي الطور نصف موجة وتطبق في هذه الحالة القوانين الخاصة بدوائر التقويم الغيـر محكوم ثلاثي الطور نصف موجة.



الشكل (٤-٤٥)

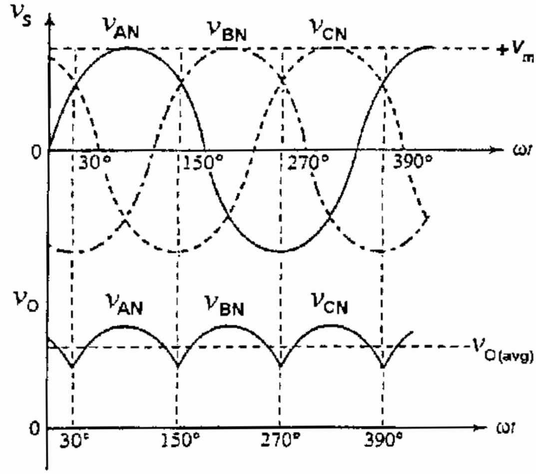
الدائرة الكهربائية لمقوم محكوم ثلاثي الطور نصف موجة بحمل مادي

لتحديد فترات التوصيل لكل ثايرستور أنظر الجدول (٤-١).

الثايرستور	بداية فترة التوصيل	نهاية فترة التوصيل	الجهد على إطراف الحمل
T_1	$30^\circ + \alpha$	$150^\circ + \alpha$	V_{AN}
T_2	$150^\circ + \alpha$	$270^\circ + \alpha$	V_{BN}
T_3	$270^\circ + \alpha$	$390^\circ + \alpha$	V_{CN}

الجدول (٤-١)

يبين الشكل (٤-٤٦) شكل موجة الدخل وموجة الخرج من اجل زاوية قدح $(\alpha = 0)$. ويكون التيار خلال الحمل في هذه الحالة متصلاً وموجب القيمة.



الشكل (٤-٤٦)

موجة الخرج لمقوم محكوم ثلاثي الطور نصف موجة حمل مادي عندما $(\alpha = 0)$

ب- إذا كانت زاوية القدح (α) محصورة ضمن الفترة $(0^\circ \le \alpha \le 30^\circ)$:-

في هذه الحالة يكون الجهد المقوم والتيار خلال الحمل موجبان. والشكل (٤-٤٧) يبين شكل موجة الدخل وموجة الخرج والتيارات من اجل زاوية قدح $(0 \le \alpha \le 30^\circ)$. والعلاقات العامة لهذه الحالة هي:-

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} V_m \ Sin\,\omega t \ d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \quad Cos\alpha$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R}$$

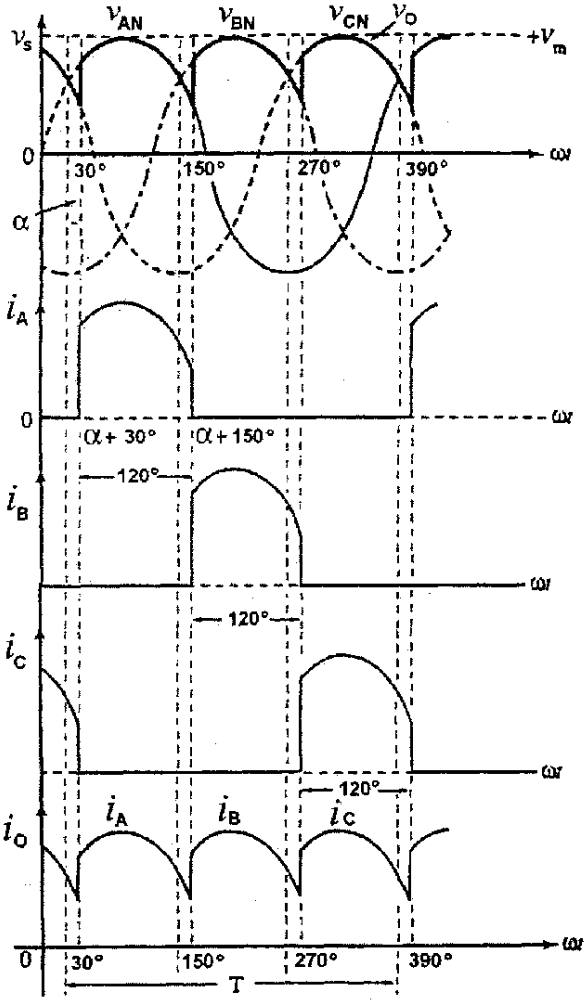
$$I_{SCR(ave)} = \frac{I_{dc}}{3}$$

$$I_{SCR(rms)} = \frac{I_{SCR(ave)}}{\sqrt{3}}$$

$$PIV = \sqrt{3}\, V_m$$

فترة التوصيل لكل ثايروستور تساوي (120°).

تردد موجة الخرج يساوي $(f_{out} = 3f_{in})$.



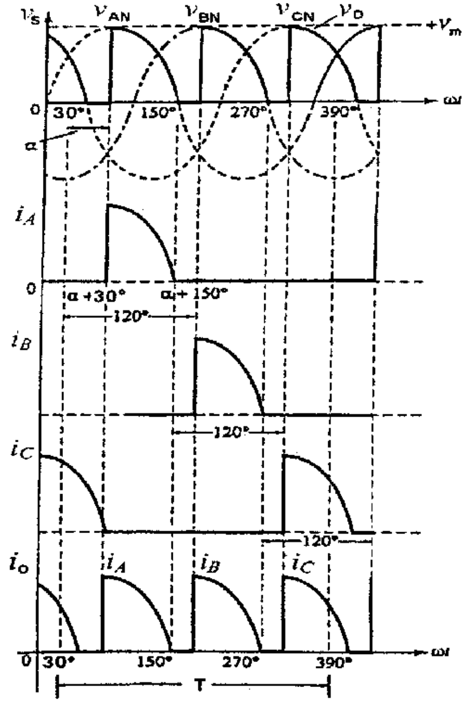
الشكل (٤-٤٧)

شكل موجة الدخل وموجة الخرج والتيارات من اجل زاوية قدح $(0 \leq \alpha \leq 30^{\circ})$

ج- إذا كانت زاوية القدح α محصورة ضمن الفترة $(30^\circ \le \alpha \le 150)^\circ$:- في هذه الحالة يكون هنالك فترات لا يصل فيها التيار إلى الحمل (فترات انقطاع للتيار) وذلك حسب قيمة زاوية القدح. تعطى القيمة المتوسطة للجهد على أطراف الحمل في هذه الحالة حسب العلاقة :-

$$V_o = \frac{3V_m}{2\pi}\left[1 + Cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right)\right] \qquad (4.75)$$

الشكل (٤-٤٨) شكل موجة الدخل وموجة الخرج والتيارات من اجل زاوية قدح $(30^\circ \le \alpha \le 150^\circ)$ (في الشكل $(\alpha = 60^\circ)$).



الشكل (٤-٤٨)

شكل موجة الدخل وموجة الخرج والتيارات من اجل زاوية قدح $(30^\circ \le \alpha \le 150^\circ)$

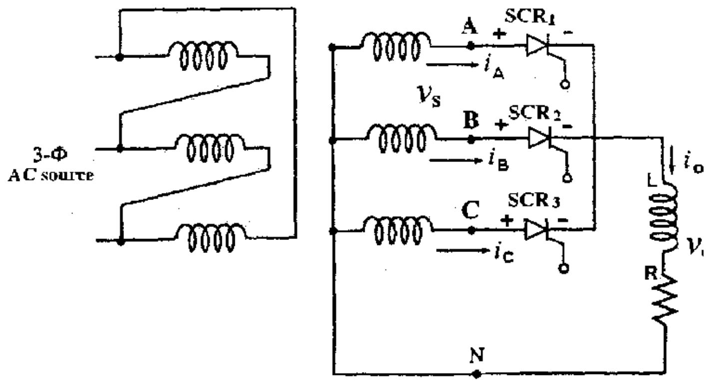
د- من اجل زاوية قدح $\left(150^{\circ} \le \alpha \le 180^{\circ}\right)$ تكون القيمة المتوسطة للجهد على أطراف الحمل مساوية للصفر.

٤-٢-٢- دائرة تقويم محكوم ثلاثي الطور نصف موجة بحمل حثي كبير بدون استخدام ديود الانطلاق الحر:-

RL Load Half -Wave Rectifiers without (FWD)

يبين الشكل (٤-٤٩) الدائرة الكهربائية لمقوم محكوم بحمل مادي حثي بدون استخدام ديود الانطلاق الحر (Free Wheeling Diode). وتكون قيم زوايا القدح في هذه الحالة $\left(0 \le \alpha \le 180^{\circ}\right)$. وتعطى القيمة المتوسطة للجهد على أطراف الحمل بالعلاقة:-

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \; Cos\alpha \qquad (4.76)$$

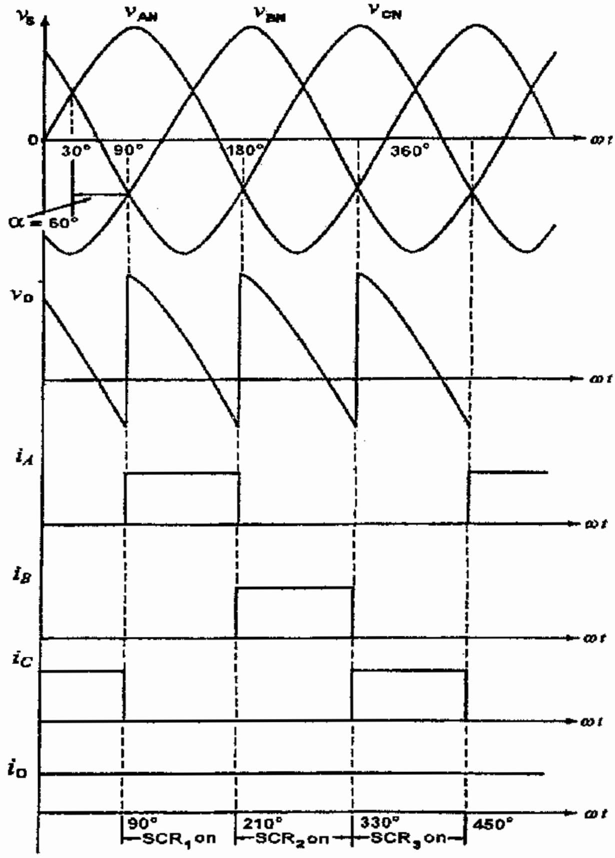


الشكل (٤-٤٩)

الدائرة الكهربائية لمقوم محكوم نصف موجة بحمل مادي حثي

من اجل زاوية قدح $\left(\alpha < 30^{\circ}\right)$ تكون القيمة المتوسط لجهد الحمل موجبة. بينما من اجل زوايا قدح $\left(\alpha > 30^{\circ}\right)$ فان القيمة المتوسطة لجهد الحمل تكون سالبة في بعض

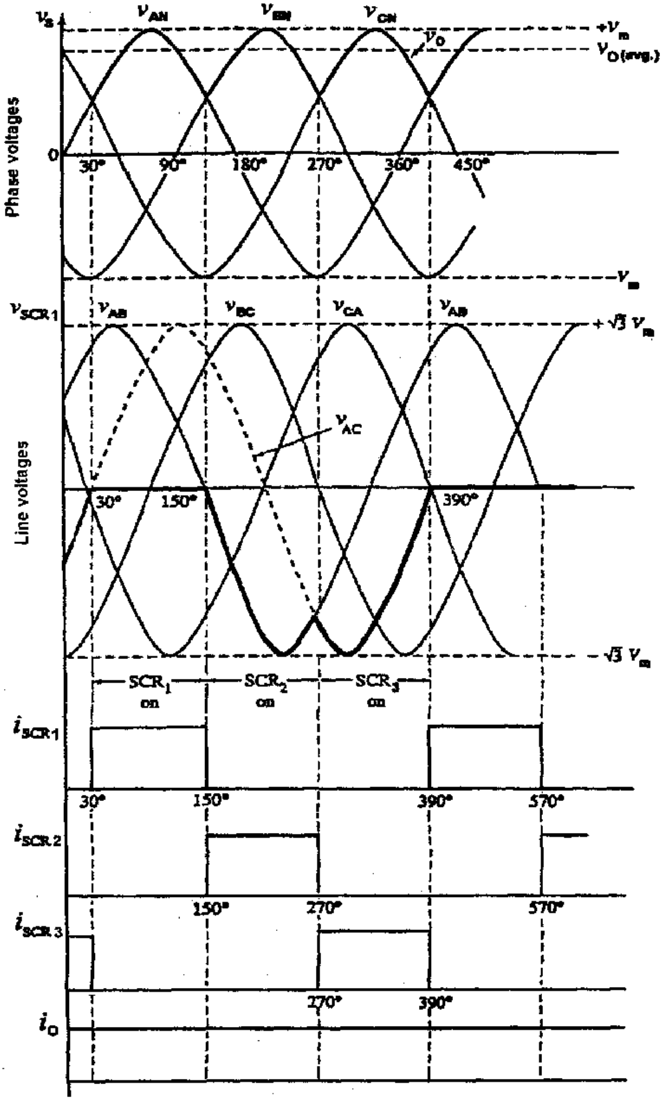
الأجزاء. الشكل (٤-٥٠) يبين شكل موجة الخرج والتيارات من اجل زاوية قدح $(\alpha = 60^\circ)$.



الشكل (٤-٥٠)

شكل موجة الخرج والتيارات من اجل زاوية قدح $(\alpha = 60^\circ)$

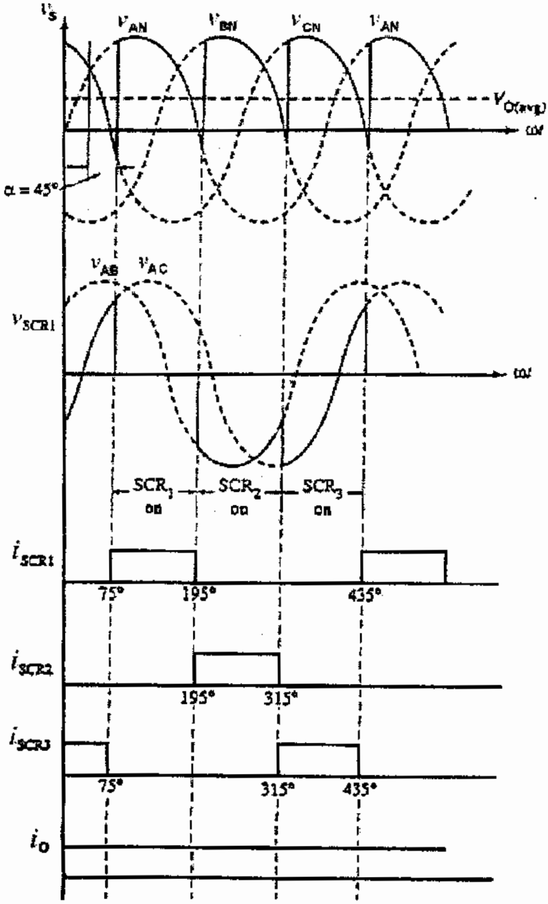
الشكل (٤-٥١) يبين جهد الانحياز العكسي على الثايروستور الأول (SCR_1) والتيارات لكل ثايروستور وتيار الحمل من اجل $(\alpha = 0^\circ)$ وحمل حثي مادي (RL).



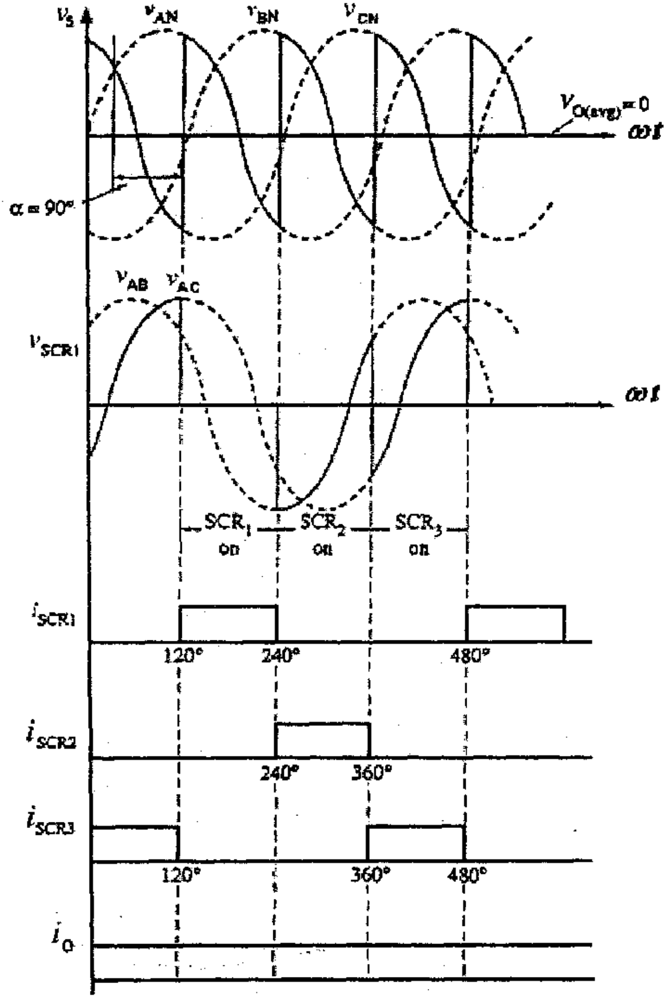
الشكل (٤-٥١)

جهد الانحياز العكسي على الثايروستور الأول والتيارات وتيار الحمل

الشكل (٤-٥٢) يبين جهد الانحياز العكسي علــى الثايروســتور الأول (SCR_1) والتيارات لكل ثايروستور وتيار الحمل من اجل $(\alpha = 45^{\circ})$ و $(\alpha = 90^{\circ})$ من اجل حمل $((RL)\ Load)$.

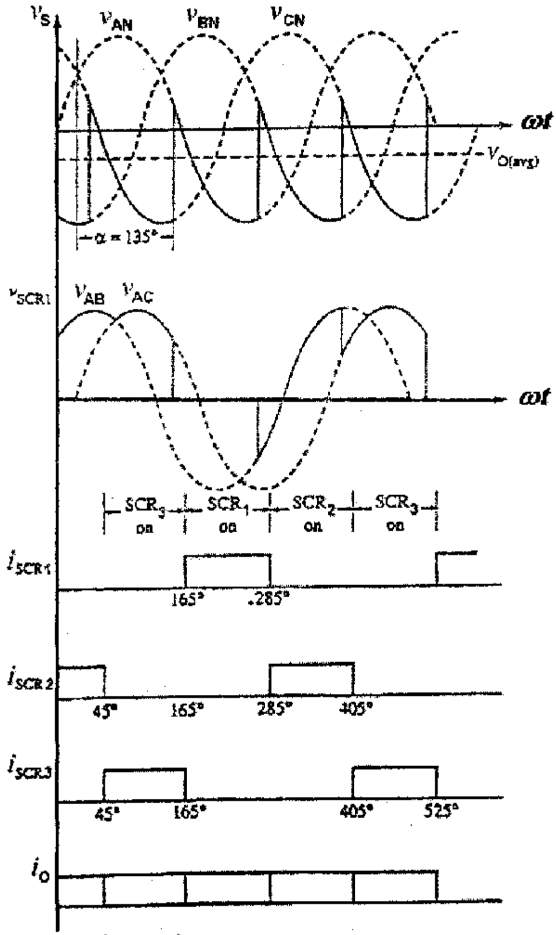


الشكل (٤- ٥٢- أ) جهد الخرج وجهد الانحياز العكسي ل (SCR_1)والتيارات لكل ثايروستور وتيار الحمل عند $(\alpha = 45^{\circ})$

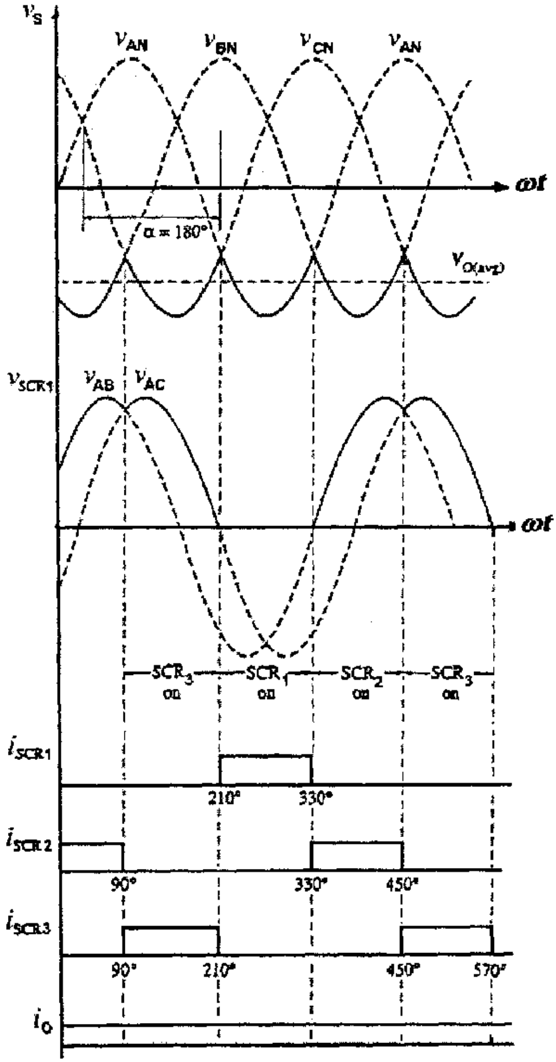


الشكل (٤-٥٢- ب) جهد الخرج وجهد الانحياز العكسي ل $\left(SCR_1\right)$ والتيارات لكل ثايروستور وتيار الحمل عند $\left(\alpha = 90°\right)$

ويبين الشكل (٤-٥٣) جهد الانحياز العكسي على الثايروستور الأول (SCR_1)، والتيارات لكل ثايروستور وتيار الحمل من اجل زوايا قدح $(\alpha = 135^\circ)$ و$(\alpha = 180^\circ)$ وحمل حثي مادي (RL).



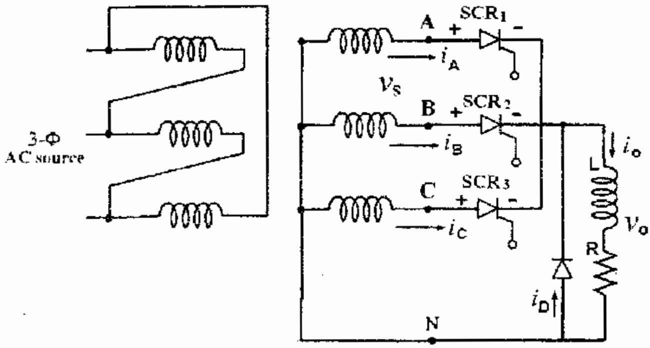
الشكل (٤-٥٣-أ) جهد الخرج وجهد الانحياز العكسي ل (SCR_1) والتيارات لكل ثايروستور وتيار الحمل عند $(\alpha = 135^\circ)$



الشكل (٤-٥٣-ب) جهد الخرج وجهد الانحياز العكسي ل (SCR_1) والتيارات لكل ثايروستور وتيار الحمل عند $(\alpha = 180^\circ)$

٤-٢-٣- دائرة تقويم محكوم ثلاثي الطور نصف موجة بحمل حثي كبير باستخدام ديود الانطلاق الحر RL Load Half -Wave Rectifiers with (FWD)

في هذه الحالة يقوم الديود بمنع التيار السالب من الوصول إلى الحمل. وتكون القيمة المتوسطة لجهد الحمل كما لو كان الحمل هو حمل مادي. يبين الشكل (٤-٥٤) الدائرة الكهربائية لهذا المقوم. والشكل (٤-٥٥) يبين شكل الموجة لجهد الدخل وجهد الخرج وجهد الانحياز العكسي على الثايروستور الأول والتيارات لكل ثايروستور وتيار الديود بالإضافة إلى تيار الحمل من اجل زاوية قدح $(\alpha = 75^{\circ})$.



الشكل (٤-٥٤)

الدائرة الكهربائية لمقوم محكوم بحمل حثي مادي

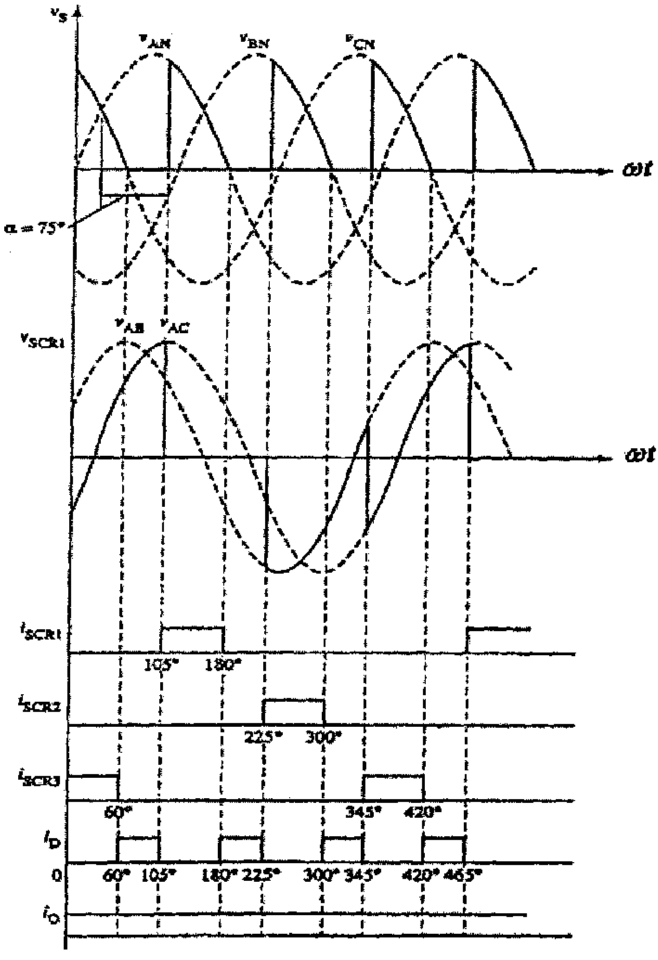
والقيمة المتوسطة لجهد الحمل تعطى بالعلاقة :-

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} V_m Sin\omega t \, d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} Cos\alpha \qquad (4.77)$$

$$V_{dm} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \qquad (4.78)$$

$$V_n = \frac{V_{dc}}{V_{dm}} = Cos\alpha \qquad (4.79)$$

حيث أن (V_n) : القيمة الاسمية المتوسطة لفولطية المخرج



الشكل (٤-٥٥)

شكل الموجة لجهد الدخل والخرج والانحياز العكسي على الثايروستور الأول والتيارات لكل ثايروستور وتيار الديود عند $(\alpha = 75°)$

القيمة الفعالة لجهد الحمل تعطى بالعلاقة :-

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{3}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} V_m^2 Sin^2\omega t d\omega t} = \sqrt{3}V_m\sqrt{\frac{1}{6}+\frac{\sqrt{3}}{8\pi}Cos2\alpha} \qquad (4.80)$$

ومن اجل حمل مادي إذا كانت زاوية القدح للثايروستور $\left(\alpha \geq \frac{\pi}{6}\right)$ يكون تيار الحمل في هذه الحالة غير متصل .

وتعطى القيمة المتوسطة لجهد الحمل بالعلاقة التالية :-

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\pi} V_m Sin\omega t d\omega t = \frac{3V_m}{2\pi}\left[1+Cos\left(\frac{\pi}{6}+\alpha\right)\right] \qquad (4.81)$$

$$V_n = \frac{V_{dc}}{V_{dm}} = \frac{1}{\sqrt{3}}\left[1+Cos\left(\frac{\pi}{6}+\alpha\right)\right] \qquad (4.82)$$

والقيمة الفعالة لجهد الحمل تعطى بالعلاقة :-

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{3}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\pi} V_m^2 Sin^2\omega t d\omega t}$$

$$= \sqrt{3}V_m\sqrt{\frac{5}{24}-\frac{\alpha}{4\pi}+\frac{1}{8\pi}Sin\left(\frac{\pi}{3}+2\alpha\right)} \qquad (4.83)$$

مثال (٤-١٣):- مقوم محكوم ثلاثي الطور نصف موجة يغذى من مصدر جهد ثلاثي الطور نجمي جهد الخط له يساوي $(208V)$. وذو حمل مادي قيمته $(R = 10\Omega)$، إذا كان المطلوب الحصول على قيمة وسطية لجهد المخرج تساوي (50%) من جهد الخرج الأعظمي إحسب:-

١- زاوية قدح الثايروستور .

٢- القيمة المتوسطة والقيمة الفعالة لتيار المخرج .

٣- القيمة المتوسطة والقيمة الفعالة لتيار الثايروستور .

٤- مردود التقويم .

٥- معامل الاستخدام TUF.

٦- معامل القدرة لدائرة الدخل .

الحل :-١-

$$V_{ph}=\frac{V_L}{\sqrt{3}}=\frac{208}{\sqrt{3}}=120.1V$$

$$V_m=\sqrt{2}V_{ph}=\sqrt{2}\times 120.1=169.83V$$

$$V_{dm}=\frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi}=\frac{3\sqrt{3}\times 169.83}{2\pi}=140.45V$$

$$V_{dc}=50\%\times V_{dm}=0.5\times 140.45=70.23V$$

من اجل الحمل المادي يكون تيار الحمل مستمرا إذا كانت زاوية قدح الثايروستور $\left(\alpha\le\frac{\pi}{6}\right)$. ويكون $\left(V_n\ge Cos\alpha\ge Cos\frac{\pi}{6}=86.6\%\right)$، وبالتالي فأنه من اجل حمل مادي وجهد خرج قيمته (50%) من الجهد الأعظمي فان التيار لا يكون مستمرا.

$$V_n=\frac{V_{dc}}{V_{dm}}=\frac{1}{\sqrt{3}}\left[1+Cos\left(\frac{\pi}{6}+\alpha\right)\right]\Rightarrow$$

$$0.5=\frac{1}{\sqrt{3}}\left[1+Cos\left(\frac{\pi}{6}+\alpha\right)\right]\Rightarrow\alpha=67.7^\circ$$

$$I_{dc}=\frac{V_{dc}}{R}=\frac{70.23}{10}=7.02A$$

-٢ $$V_{rms}=\sqrt{3}V_m\sqrt{\frac{5}{24}-\frac{\alpha}{4\pi}+\frac{1}{8\pi}Sin\left(\frac{\pi}{3}+2\alpha\right)}=94.74V$$

$$I_{rms}=\frac{V_{rms}}{R}=\frac{94.74}{10}=9.47A$$

٣-القيمة المتوسطة لتيار الثايروستور :-

$$I_{DT} = \frac{I_{dc}}{3} = \frac{7.02}{3} = 2.34A$$

القيمة الفعالة لتيار الثايروستور

$$I_{RT} = \frac{I_{rms}}{\sqrt{3}} = \frac{9.47}{\sqrt{3}} = 5.47A$$

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{V_{dc} I_{dc}}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{70.03 \times 7.02}{94.7 \times 9.47} = 54.95\%$$

٥- القيمة الفعالة لتيار الحمل هي نفسها القيمة الفعالة لتيار الملف الثانوي لمحول الدخل. وجهد الطور للحمل هو نفسه جهد الطور للملف الثانوي للمحول .

$$P_{VA} = \sqrt{3} V_{ph} I_{ph} = \sqrt{3} \times 120.1 \times 9.47 = 1970.84\ VA$$

$$TUF = \frac{P_{dc}}{P_{VA}} = \frac{70.23 \times 7.02}{1970.84} = 0.25 = 25\%$$

قدرة الخرج تعطى بالعلاقة :-

$$P_o = I_{rms}^2 \times R = (9.47)^2 \times 10 = 869.81\ \ W$$

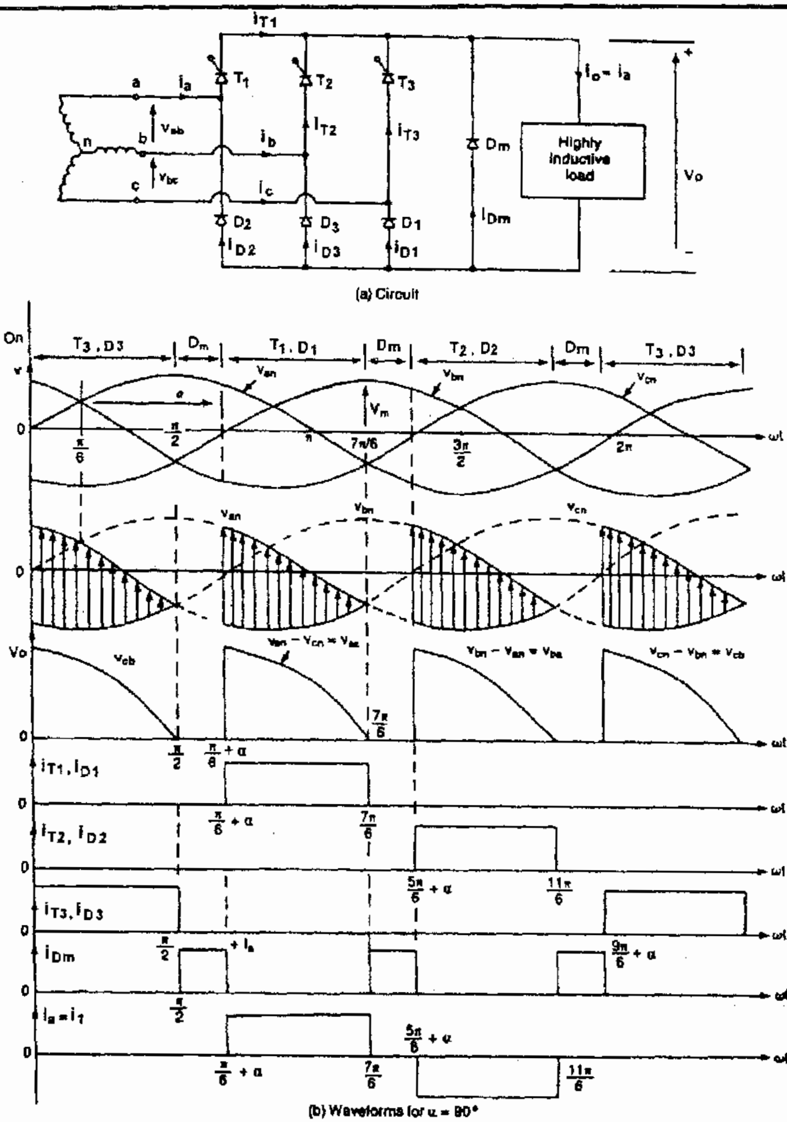
$$PF = \frac{P_o}{P_{VA}} = \frac{896.81}{1970.84} = 0.455\ \ (lagging)$$

ملاحظة :-نتيجة وجود زاوية القدح للثايروستور (α) فان المركبات الأساسية لتيار الخط للمصدر تتأخر عن جهد الطور للمصدر.

٤-٢-٤- التقويم المحكوم النصفي ثلاثي الأطوار

Three-Phase Semi converters

يستخدم هذا المقوم المحكوم في الصناعة في التطبيقات حتى $(120KW)$ وضمن الربع الأول لمنطقة العمل. حيث يكون الجهد والتيار الناتجان عن عملية التقويم موجبان. ومعامل القدرة لهذا المقوم المحكوم يقل كلما زادت زاوية القدح وهو أفضل من المقوم المحكوم نصف الموجة ثلاثي الطور.



الشكل (٤-٥٦)

دائرة المقوم المحكوم النصفي وشكل موجة الخرج

والشكل (٤-٥٦) يبين دائرة وشكل موجة الخرج لهذا النوع من المقومات المحكومة في حال كون الحمل حملاً حثياً كبير القيمة وبوجود (FWD).

مبدأ العمل:-

خلال الفترة $\left(\frac{\pi}{6} \le \omega t \le \frac{7\pi}{6}\right)$ يكون الثايروستور (T_1) منحازاً انحيازاً أمامياً. فإذا تم قدح الثايروستور (T_1) بزاوية قدح مقدارها $\left(\omega t = \frac{\pi}{6} + \alpha\right)$ فان الثايروستور T_1 والديود (D_1) يكونان موصولان وجهد الخط (v_{ac}) يظهر خلال الحمل. عند $\left(\omega t = \frac{7\pi}{6}\right)$ يبدأ الجهد (v_{ac}) بالجزء السالب ويقوم الديود (D_m) بالتوصيل ويستمر تيار الحمل بالمرور عبر الديود (D_m) ويتحول الثايرستور (T_1) والديود (D_1) إلى حالة القطع.

وفي حالة عدم وجود الديود (D_m) فان الثايروستور (T_1) يستمر في التوصيل حتى يتم قدح الثايروستور (T_2) عند $\left(\omega t = \frac{5\pi}{6} + \alpha\right)$ ويتحدد عمل الديود (D_m) في فترة توصيل الثايروستور (T_1) والديود (D_2).

أما إذا كانت زاوية القدح $\left(\alpha \le \frac{\pi}{3}\right)$ فان كل ثايروستور يتحول إلى حالة التوصيل خلال فترة $\left(\frac{2\pi}{3}\right)$ والديود (D_m) لا يقوم بالتوصيل.

فترات التوصيل للثايروستورات والديودات الموصولة في الدائرة الكهربائية المبينة في الشكل (٤-٥٦).

$$T_1 \rightarrow 30^\circ + \alpha \rightarrow 30^\circ + 120^\circ + \alpha$$

$$T_2 \rightarrow 150^\circ + \alpha \rightarrow 270^\circ + \alpha$$

$$T_3 \rightarrow 270^\circ + \alpha \rightarrow 30^\circ + \alpha$$

$$D_1 \to 90^\circ + \alpha \to 210^\circ + \alpha$$
$$D_2 \to 210^\circ + \alpha \to 330^\circ + \alpha$$
$$D_3 \to 330^\circ + \alpha \to 90^\circ + \alpha$$

وتتحدد الجهود بالنسبة للأطوار الثلاثة مع الإزاحة الطورية بين كل فاز وآخر كما يلي:-

$$\begin{aligned} v_{an} &= V_m Sin\,\omega t \\ v_{bn} &= V_m Sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{cn} &= V_m Sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \qquad (4.84)$$

وجهود الخطوط تعطى بالعلاقات الطورية التالية:-

$$\begin{aligned} v_{ac} &= v_{an} - v_{cn} = \sqrt{3} V_m Sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \\ v_{ba} &= v_{bn} - v_{an} = \sqrt{3} V_m Sin(\omega t - \frac{5\pi}{6}) \\ v_{cb} &= v_{cn} - v_{bn} = \sqrt{3} V_m Sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \qquad (4.85)$$

حيث أن (V_m):- هي القيمة العظمى لجهد الطور في توصيله النجمة. وتحليل عمل المقوم يعتمد على زاوية القدح (α).

إذا كانت $(\alpha < 60^\circ)$:- في هذه الحالة يكون الجهد على أطراف الحمل مستمراً ولا يخضع ديود الانطلاق الحر (FWD) لجهد انحياز عكسي، ويكون عدد نبضات المخرج مساويا الى ستة نبضات. وتعطى القيمة المتوسطة للجهد على إطراف الحمل بالعلاقة :-

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} v_{ac}\, d\omega t$$

$$= \frac{3\sqrt{3}\, V_m}{2\pi}\left[1 + Cos\ \alpha\right] \qquad (4.86)$$

وهذا الجهد يتغير من الصفر إلى القيمة العظمى عندما تتغير زاوية القدح (α) من الصفر الى (π).

$$V_{dm} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi}$$

$$V_n = \frac{V_{dc}}{V_{dm}} = 0.5\left[1 + Cos\,\alpha\right] \qquad (4.87)$$

وتكون القيمة المتوسطة للتيار المار من خلال الثايروستور تساوي :-

$$I_{T(ave)} = \frac{I_{dc}}{3} \qquad (4.88)$$

وتكون القيمة الفعالة للتيار المار من خلال الثايروستور تساوي :-

$$I_{T(rms)} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{3}} \qquad (4.89)$$

إن القيمة الفعالة لجهد الخرج تعطى بالعلاقة التالية :-

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} 3V_m^2 Sin^2(\omega t - \frac{\pi}{6}) d\omega t}$$

$$= \sqrt{3}V_m \sqrt{\frac{3}{4\pi}\left[\frac{2\pi}{3} + \frac{Sin2\alpha}{2}\right]} \qquad (4.90)$$

٢- إذا كانت $(60^\circ \le \alpha \le 180^\circ)$:- في هذه الحالة يكون الجهد على أطراف الحمل غير متصل، يعمل ديود الانطلاق الحر (FWD) تحت تأثير الانحياز الأمامي ليعمل على استمرار مرور التيار الى الحمل. عدد نبضات المخرج يساوي ثلاثة نبضات، وتعطى القيمة المتوسطة لجهد الحمل بالعلاقة التالية:-

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}} v_{ac}\, d\omega t = \frac{3}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}} \sqrt{3}V_m Sin(\omega t - \frac{\pi}{6})d\omega t$$

$$= \frac{3\sqrt{3}\,V_m}{2\pi}[1 + Cos\,\alpha] \qquad (4.91)$$

تكون القيمة المتوسطة للتيار المار من خلال الثايروستور تساوي:-

$$I_{T(ave)} = \frac{I_{dc}}{3} \qquad (4.92)$$

تكون القيمة الفعالة للتيار المار من خلال الثايروستور تساوي:-

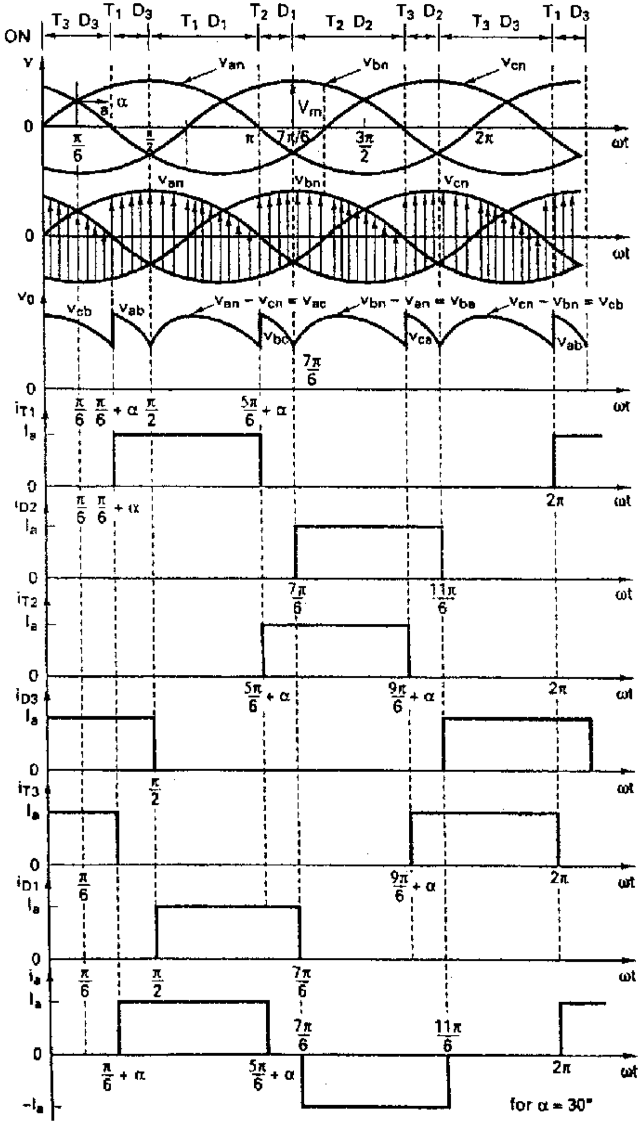
$$I_{T(rms)} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{3}} \qquad (4.93)$$

إن القيمة الفعالة لجهد الخرج تعطى بالعلاقة الآتية:-

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{3}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}} 3V_m^2 Sin^2(\omega t - \frac{\pi}{6})d\omega t} =$$

$$= \sqrt{3}V_m\sqrt{\frac{3}{4\pi}\left[\pi - \alpha + \frac{Sin2\alpha}{2}\right]} \qquad (4.94)$$

والشكل (٤-٥٧) يبين شكل موجة جهد الخرج والتيارات لدائرة مقوم محكوم نصفي من اجل زاوية قدح $(\alpha = 30^\circ)$.

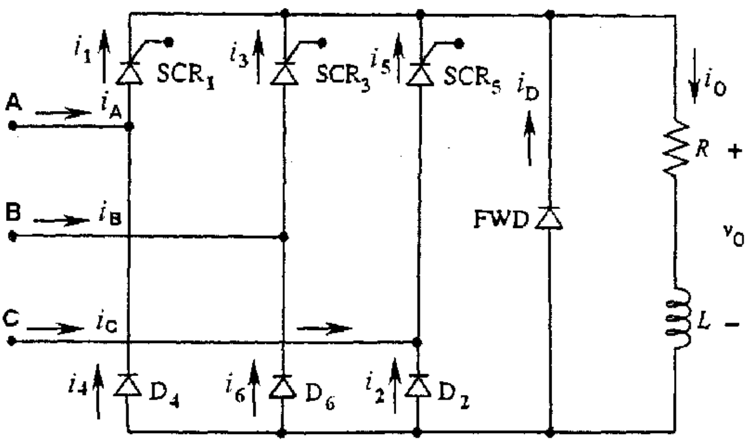


الشكل (٤-٥٧)

شكل موجة جهد الخرج والتيارات لدائرة مقوم محكوم نصفي عند $(\alpha = 30^\circ)$.

في الدائرة المبينة في الشكل (٤-٥٨) وعلى اعتبار أن زاوية القدح تقاس من نقطة تقاطع جهد الخط (v_{AB}) مع جهد الخط (v_{CB}). فإن فتـــرات التوصـــيل للثايروستورات والديودات الموصولة في الدائرة تعطى بالشكل التالي:-

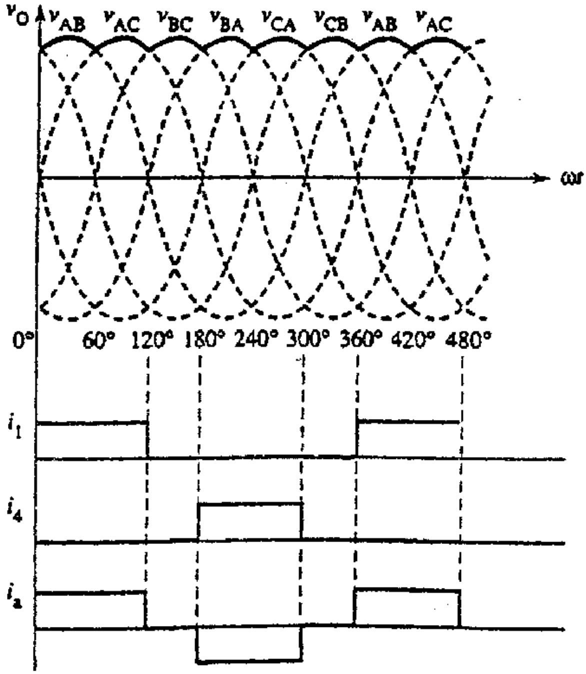
$$SCR_1 \rightarrow \alpha \rightarrow 120^\circ + \alpha$$
$$SCR_3 \rightarrow 120^\circ + \alpha \rightarrow 240^\circ + \alpha$$
$$SCR_5 \rightarrow 240^\circ + \alpha \rightarrow 360^\circ + \alpha$$
$$D_2 \rightarrow 60^\circ + \alpha \rightarrow 180^\circ$$
$$D_4 \rightarrow 180^\circ \rightarrow 300^\circ$$
$$D_6 \rightarrow 300^\circ + \alpha \rightarrow 60^\circ + \alpha$$



الشكل (٤-٥٨)

مقوم محكوم نصفي بحمل حثي مادي مع ديود الانطلاق الحر

الشكل (٤-٥٩) يبين شكل موجة الجهد والتيار لمقوم محكوم نصفي بحمل حثـــي مادي من أجل زاوية قدح $(\alpha = 0)$.

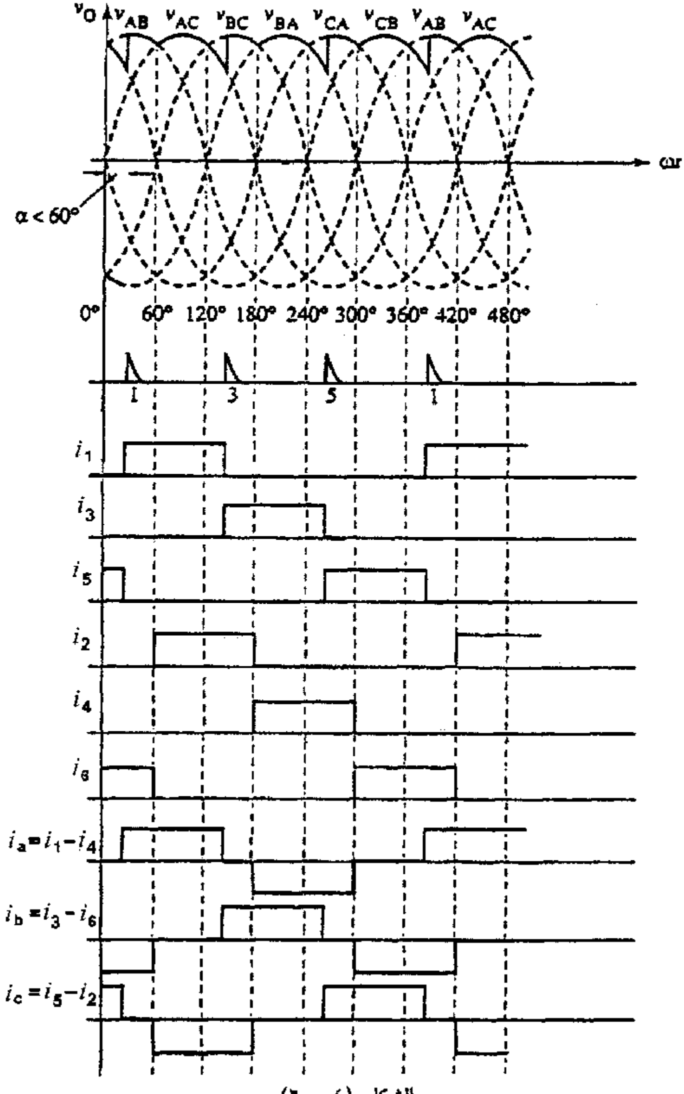


الشكل (٤-٥٩)

شكل موجة الجهد والتيار لمقوم محكوم نصفي بحمل حثي مادي وزاوية قدح $(\alpha = 0)$

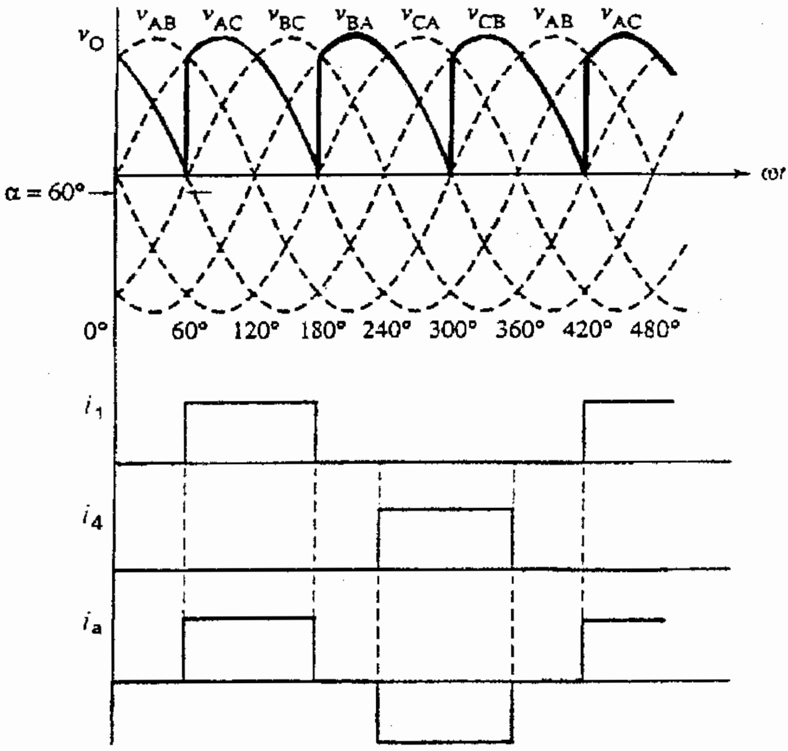
والشكل (٤-٦٠) يبين شكل موجة الجهد والتيار لمقوم محكوم نصفي بحمل حثـــي مادي من اجل زاوية قدح $(\alpha = 20^\circ)$.

والشكل (٤-٦١) يبين شكل موجة الجهد والتيار لمقوم محكوم نصفي بحمل حثـــي مادي من اجل زاوية قدح $(\alpha = 60^\circ)$.



الشكل (٤-٦٠)

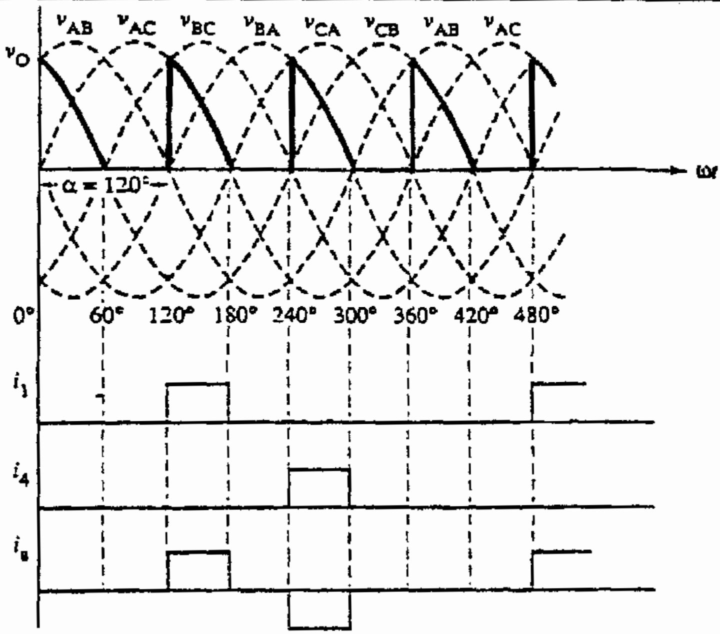
شكل موجة الجهد والتيار لمقوم محكوم نصفي بحمل حثي مادي وزاوية قدح ($\alpha = 20^\circ$)



الشكل (٤-٦١)

شكل موجة الجهد والتيار لمقوم محكوم نصفي بحمل حثي مادي وزاوية قدح $(\alpha = 60^\circ)$

والشكل (٩-٦٢) يبين شكل موجة الجهد والتيار لمقوم محكوم نصفي بحمل حثــي مادي من اجل زاوية قدح $(\alpha = 120^\circ)$.



الشكل (٤–٦٢)

شكل موجة الجهد والتيار لمقوم محكوم نصفي بحمل حثي مادي وزاوية قدح ($\alpha = 120^\circ$)

مثال (٤–١٤):– مقوم محكوم ثلاثي الطور نصفي، يُغذى من مصدر جهد ثلاثي الطور، جهد الخط يساوي ($208\,V$) ذو حمل مادي قيمته ($R = 10\,\Omega$). إذا كان المطلوب الحصول على قيمة متوسطة لجهد الخرج تساوي ($50\,\%$) من القيمة العظمى لجهد الخرج المطلوب حساب القيم التالية:–

١– زاوية القدح اللازمة لتحقيق هذا الشرط.

٢– القيمة المتوسطة والقيمة الفعالة لتيار الخرج.

٣– القيمة المتوسطة والقيمة الفعالة لتيار الثايروستور.

٤– مردود التقويم.

٥- معامل الاستخدام.

٦- معامل القدرة لدائرة الدخل.

الحل:-

$$V_{ph} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120.1\ V$$

$$V_m = \sqrt{2}V_{ph} = 169.83\ V$$

$$V_{dm} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} = \frac{3\sqrt{3}\times 169.83}{\pi} = 280.9\ \ V$$

$$V_{dc} = 0.5V_{dm} = 0.5\times 280.9 = 140.45\ \ V$$

من اجل $\left(\alpha \geq \frac{\pi}{3}\right)$ فإن:-

$$V_n \leq \frac{1+Cos\frac{\pi}{3}}{2} = 75\%$$

من أجل حمل مادي وجهد خرج (50%) من القيمة العظمى فإن الجهد يكون غير مستمر.

$$V_n = 0.5(1+Cos\alpha) \quad \Rightarrow \quad 0.5 = 0.5(1+Cos\alpha) \ \Rightarrow \ \alpha = 90^{\circ}$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{140.45}{10} = 14.05 A$$

$$V_{rms} = \sqrt{3}V_m\sqrt{\frac{3}{4\pi}(\pi - \frac{\pi}{2} + \frac{Sin2\alpha}{2})}$$

$$= \sqrt{3}\times 169.83\sqrt{\frac{3}{4\pi}\left[\pi - \frac{\pi}{2} + \frac{Sin\pi}{2}\right]} = 180.13\ \ V$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{180.13}{10} = 18.01\ \ A$$

٣- القيمة المتوسطة والقيمة الفعالة لتيار الثايرستور:-

$$I_{DT}=\frac{I_{dc}}{3}=\frac{14.05}{3}=4.68A$$

$$I_{RT}=\frac{I_{rms}}{\sqrt{3}}=\frac{18.01}{\sqrt{3}}=10.4A$$

٤-

$$\eta=\frac{P_{dc}}{P_{ac}}=\frac{140.45\times14.05}{180.13\times18.01}=0.608=60.8\%$$

٥- حيث أن الثايروستور يوصل الى $\left(\frac{2\pi}{3}\right)$ فإن القيمة المتوسطة لتيار الخط للمدخل:-

$$I_{SLine}=I_{rms}\sqrt{\frac{2}{3}}=14.71A$$

$$P_{VA}=3V_{ph}I_{ph}=3\times120.1\times14.71=5300W$$

$$TUF=\frac{P_{dc}}{P_{VA}}=\frac{140.45\times14.05}{5300}=0.372$$

٦- القدرة على المخرج:-

$$P_{o}=I_{rms}^{2}R=(18.01)^{2}\times10=3243.6W$$

$$PF=\frac{3243.6}{5300}=0.612(Logging)$$

وهو أفضل من معامل القدرة لمقوم محكوم أحادي الطور نصف موجة .

الفترة من $(180^\circ \leftarrow 300^\circ)$ فان (SCR_4) يوصل النقطة (2) مـــع الطـــور (A). وخلال الفترة من $(300^\circ \leftarrow 420^\circ)$ فان (SCR_6) يوصل النقطة (2) مع الطـــور (B). خلال الفترة من $(60^\circ \leftarrow 180^\circ)$ فإن (SCR_2) يوصل النقطة (2) مع الطور (C). ويكون الجهد (V_{2N}) هـــو القيمـــة العظمـــى الـــسالبة لجهـــود الأطـــوار (V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}).

ويكون جهد الخرج (V_{out}) على الحمل هو مجموع الجهد على كل من المجموعتين الموجبة و السالبة.

$$V_{out} = V_{12} = V_{1N} - V_{2N} \qquad (4-95)$$

الجدول (٤-٢) يلخص النتائج السابقة:-

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	A	C	AC
$120-180^o$	B	C	BC
$180-240^o$	B	A	BA
$240-300^o$	C	A	CA
$300-360^o$	C	B	CB
$360-420^o$	A	B	AB

الجدول (٤-٢)

للمقوم المحكوم ثلاثي الطور موجة كاملة يكون شكل موجة الخرج يتـــألف من ستة نبضات لجهد الخط. وتردد موجة الخرج يساوي ستة أضعاف تردد موجة الدخل $(6f_S)$. القيمة المتوسطة لجهد الحمل تساوي ضعف القيمة المتوسطة لجهد الخرج لدائرة التقويم المحكوم ثلاثي الطور نصف موجة. فتـــرة التوصـــيل لكـــل

ثايروستور تساوي (120°). يكون هنالك ثايروستورين على الأقل في حالة التوصيل في نفس الفترة الزمنية. القيمة العظمى لجهد الانحياز العكسي للثايريستور يساوي $\left(PIV = V_{Lm} = \sqrt{3}\,V_m\right)$.

إذا كان تتابع الأطوار الثلاثة هو (ABC) فان تتابع القدح للثايروستورات هو $(1+2\,,2+3\,,3+4\,,4+5\,,5+6\,,6+1)$ وكل ثايروستور يوصل لفترة (60°) في كل جزء. والشكل (٤-٦٤) يبين موجة الدخل (جهد الطور) وشكل موجة الخرج للثايروستورات وشكل موجة التيارات في حال كون $(\alpha = 0)$. يمكن تحديد التيارات في كل ثايروستور من الجدول رقم (٢).

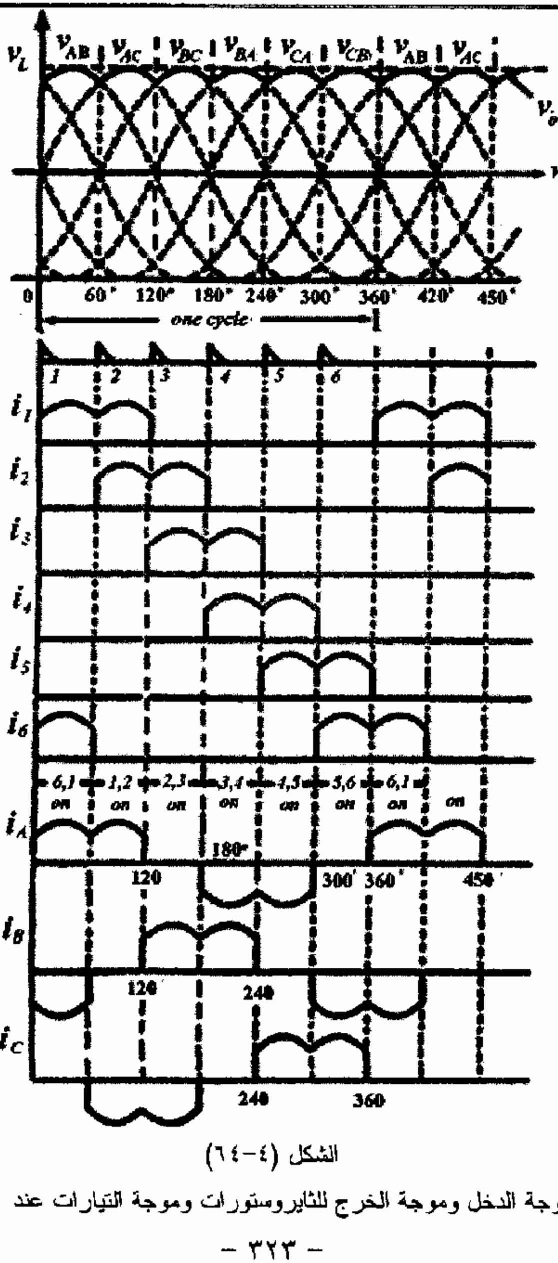
وتعطى تيارات الخطوط بالعلاقات التالية :-

$$i_A = i_1 - i_4$$
$$i_B = i_3 - i_6$$
$$i_C = i_5 - i_2 \qquad (4-96)$$

وبالتالي يمكن تأخير توصيل الثايروستور بزاوية قدح (α) مقاسة من نقطة التوصيل الطبيعية للتوصيل. وبالتالي يمكن تقليل القيمة المتوسطة لجهد الحمل.

جهد الانحياز العكسي على كل ثايروستور يحدد بسهولة اعتماداً على الجدول (٤-٣). كمثال نأخذ جهد الانحياز العكسي على الثايروستور (SCR_1). في البداية نلاحظ أن جهد الثايروستور (v_{SCR_1}) هو (v_{A1}). لذلك خلال الفترة من $(0 \leftarrow 120^{\circ})$ فان $(V_{A1} = 0)$ حيث أن (SCR_1) يكون في حالة توصيل، وخلال الفترة من $(120 \leftarrow 240^{\circ})$ يكون (SCR_1) في حالة عدم توصيل وبالتالي فإن $(v_{A1} = v_{AB})$ حيث إن النقطة (١) توصل مع الطور (B).

وخلال الفترة من $(240^{\circ} \leftarrow 360^{\circ})$ يكون (SCR_1) في حالة عدم توصيل وبالتالي فان $(v_{A1} = v_{AC})$ حيث إن النقطة (١) توصل مع الطور (C). والنتائج لجميع الأطوار مبينة في الجدول (٤-٣) .



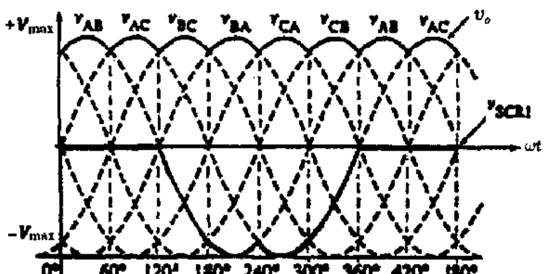
الشكل (٤-٦٤)

شكل موجة الدخل وموجة الخرج للثايروستورات وموجة التيارات عند $(\alpha = 0)$

والشكل (٤-٦٥) يبين جهد الانحياز العكسي للثايروستور (SCR_1) من اجل زاوية قدح $(\alpha = 0)$. وكما هو واضح من الشكل فان القيمة العظمى لجهد الانحياز العكسي للثايروستور $(PIV = V_{Lm} = \sqrt{3}\, V_m)$ ويجدر الملاحظة كذلك أن الثايروستور يجب أن يتحمل جهد الانحياز الأمامي المطبق، حيث أن القيمة العظمى لهذا الجهد تعتمد على قيمة زاوية القدح.

Interval	V_{SCR1}	V_{SCR3}	V_{SCR5}	V_{SCR4}	V_{SCR6}	V_{SCR2}
$0-60^o$	0	*BA*	*CA*	*BA*	0	*BC*
$60-120^o$	0	*BA*	*CA*	*CA*	*CB*	0
$120-180^o$	*AB*	0	*CB*	*CA*	*CB*	0
$180-240^o$	*AB*	0	*CB*	0	*AB*	*AC*
$240-300^o$	*AC*	*BC*	0	0	*AB*	*AC*
$300-360^o$	*AC*	*BC*	0	*BA*	0	*BC*

جدول (٤-٣)

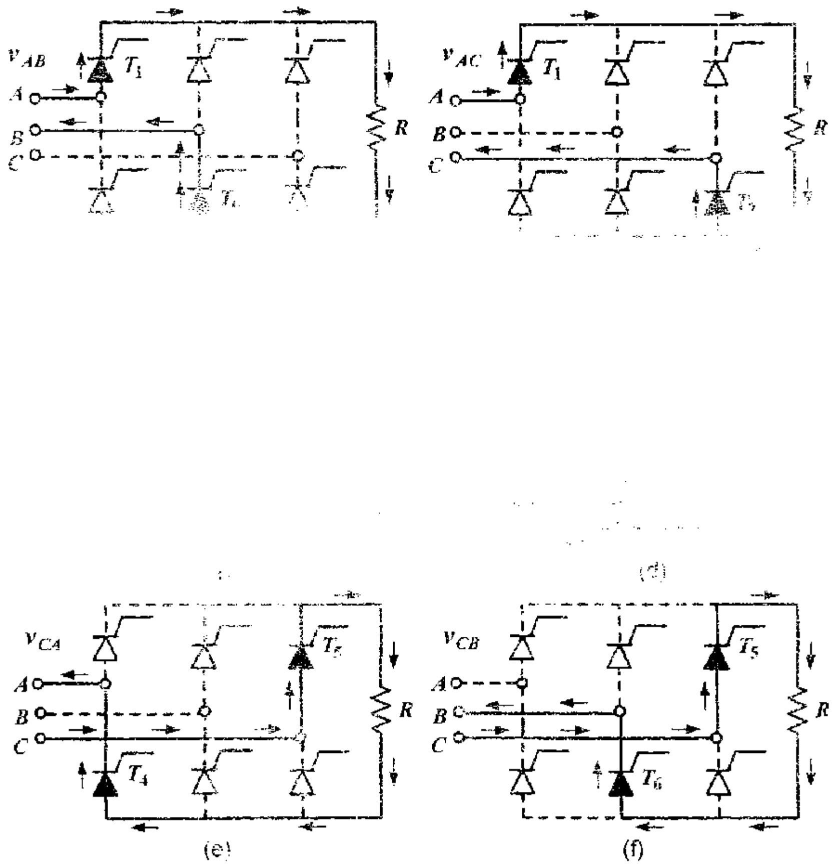


الشكل (٤-٦٥)

جهد الانحياز العكسي للثايروستور (SCR_1) من اجل زاوية قدح $(\alpha = 0)$.

وكلما كانت زاوية القدح اكبر يجب أن يتحمل الثايروستور جهد انحياز أمامي كبير. بيان طريقة توصيل الثايروستورات للمقوم المحكوم ثلاثي الطور موجة كاملة

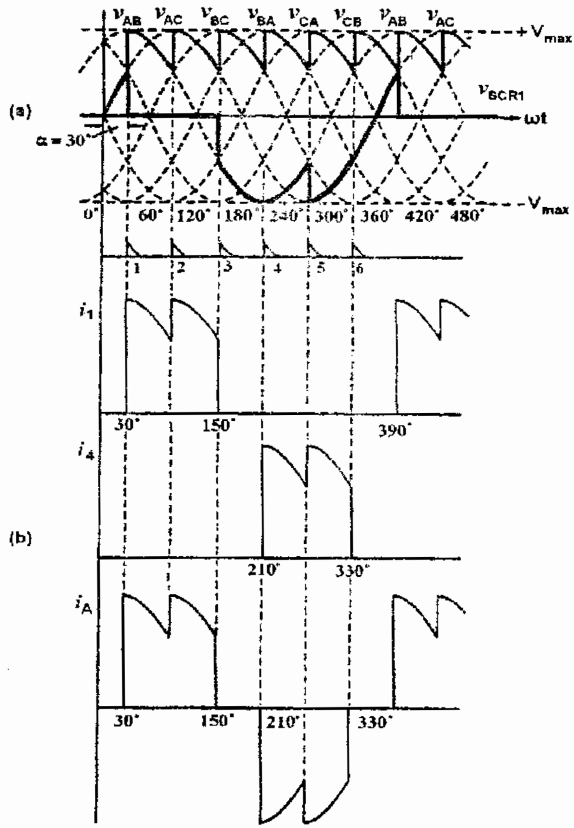
من اجل زاوية قدح $(\alpha = 0)$. يمثل الشكل (٤-٦٦) تتابع الأطوار مع تتابع عمل الثايرستورات في كل طور.



الشكل (٤-٦٦)

تتابع لأطوار مع تتابع عمل الثايروستورات في كل طو.

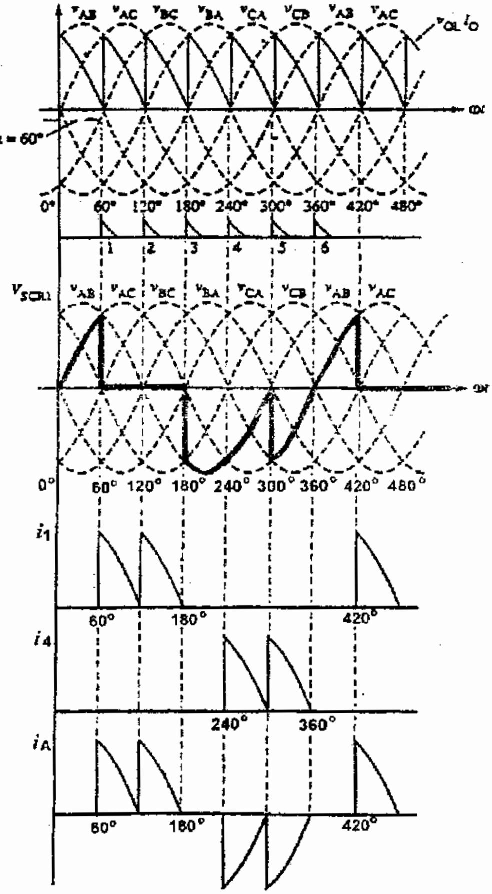
يبين الشكل (٤-٦٧) شكل موجة جهد الخرج وجهد الانحياز العكسي للثايروستور (SCR_1) والتيارات (i_1, i_4, i_A) لمقوم محكوم ثلاثي الطور موجة كاملـــة بحمـــل مادي عند زاوية قدح $(\alpha = 30^\circ)$.



الشكل (٤-٦٧)

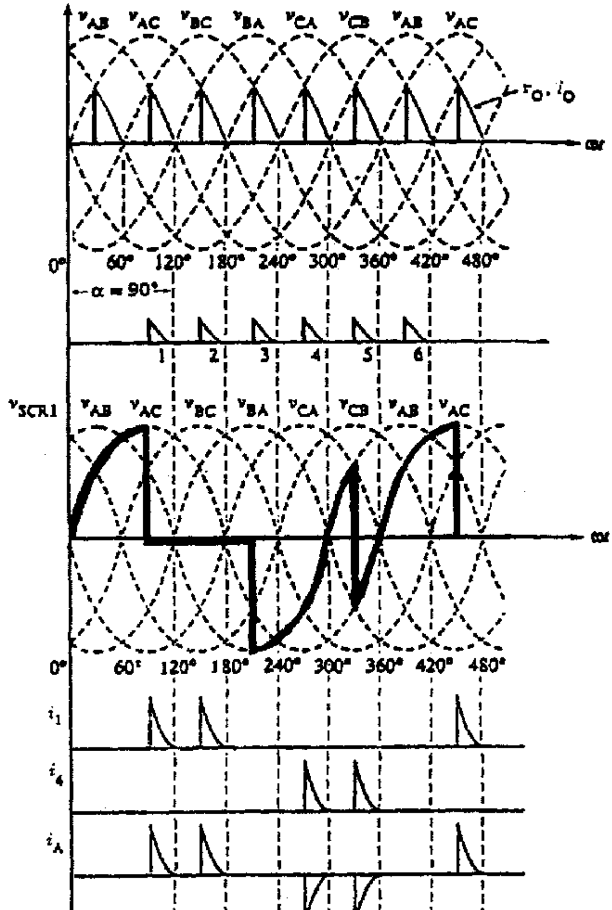
شكل موجة جهد الخرج وجهد الانحياز العكسي للثايروستور والتيارات عند $(\alpha = 30^\circ)$

يبين الشكلين (٤-٦٨) و (٤-٦٩) شكل موجة جهد الخرج وجهد الانحياز العكسي للثايروستور (SCR_1) والتيارات (i_1, i_4, i_A) لمقوم محكوم ثلاثي الطــور موجــة كاملة بحمل مادي من اجل زاويا قدح $(\alpha = 60^\circ, 90^\circ)$.



الشكل (٤- ٦٩-أ)

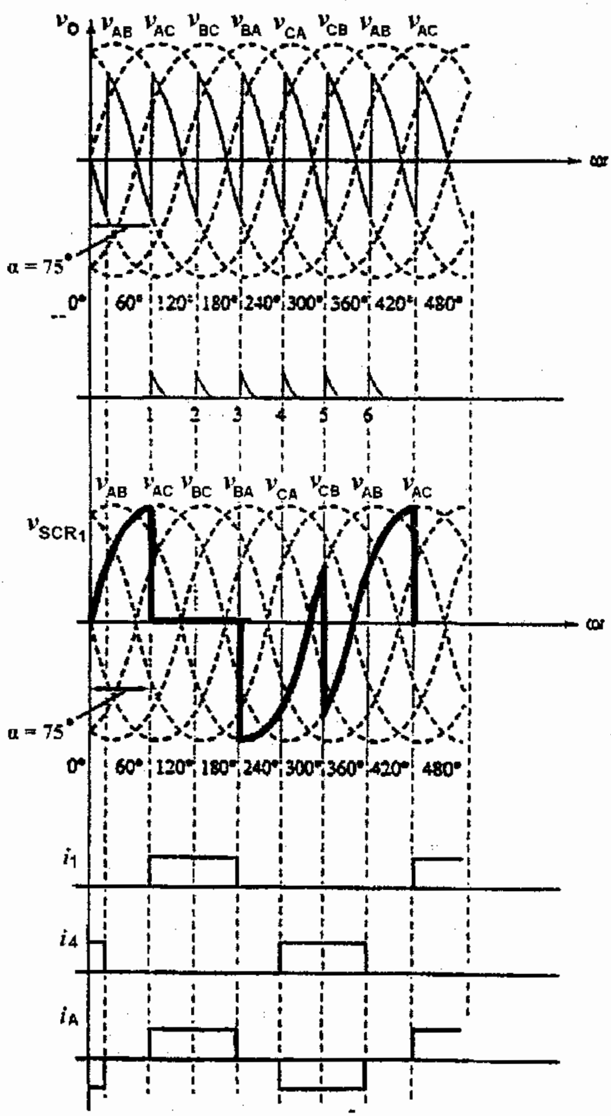
شكل موجة الخرج للتيارات عند $(\alpha = 60)$



الشكل (٤- ٦٩-ب)

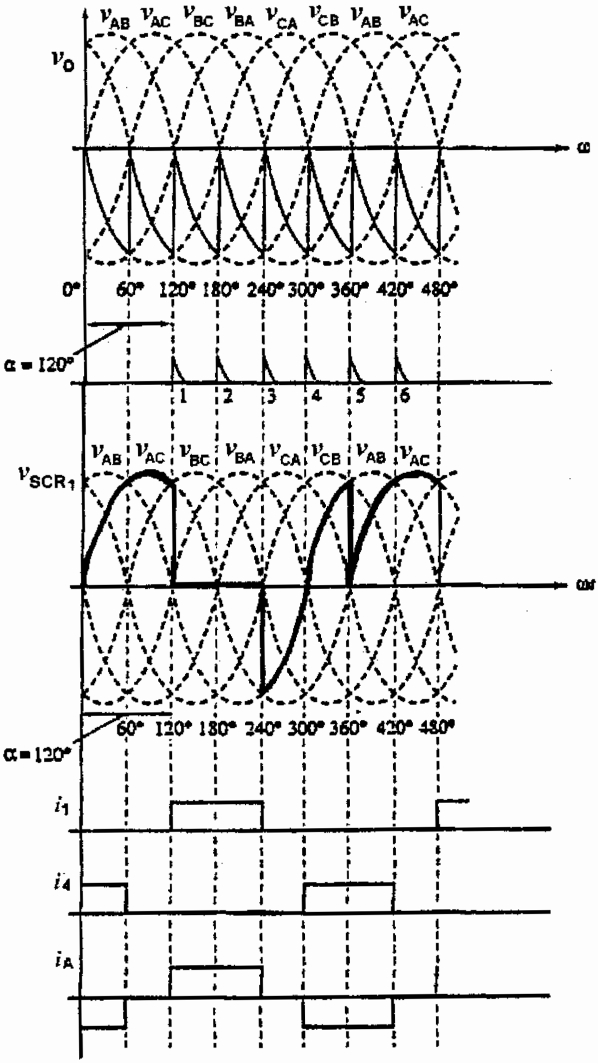
شكل موجة الخرج للتيارات عند $(\alpha = 90)$

يبين الشكل (٤-٧٠) شكل موجة جهد الخرج وجهد الانحياز العكسي للثايروستور (SCR_1) والتيارات (i_1, i_4, i_A)، لمقوم محكوم ثلاثي الطور موجة كاملة بحمل حثي كبير من اجل زاويا قدح $(\alpha = 75^{\circ}, 120^{\circ})$.



الشكل (٤- ٧٠-أ)

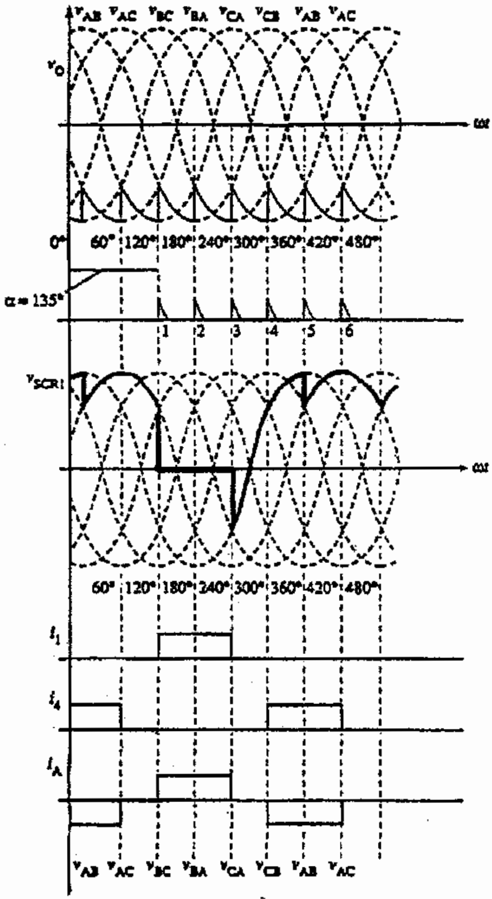
شكل موجة الخرج للتيارات عند $(\alpha = 75)$



الشكل (٤-٧٠-ب)

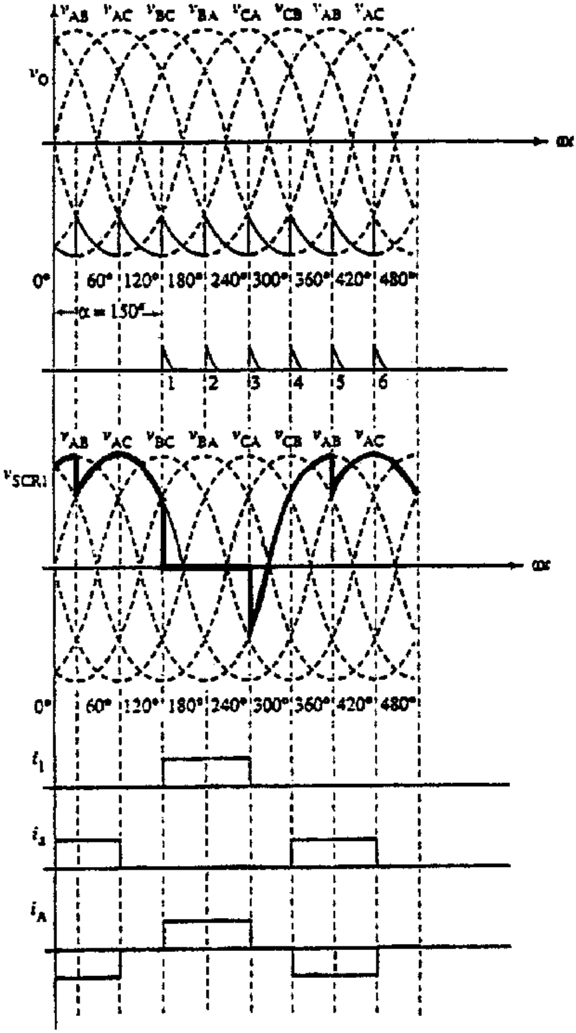
شكل موجة الخرج للتيارات عند $(\alpha = 120)$

يبين الشكل (٤-٧١) شكل موجة جهد الخرج وجهد الانحياز العكسي للثايروستور (SCR_1) والتيارات (i_1, i_4, i_A) لمقوم محكوم ثلاثي الطور موجة كاملة بحمل حثي كبير من اجل زاوية قدح $(\alpha = 135^\circ, 150^\circ)$.



الشكل (٤- ٧١-أ)

شكل موجة الخرج للتيارات عند $(\alpha = 135)$



الشكل (٤- ٧١-ب)

شكل موجة الخرج للتيارات عند $(\alpha = 150)$

مبدأ العمل:-

لشرح مبدا العمل لمقوم محكوم ثلاثي الطور موجة كاملة، أنظر أولاً الى الشكل (٤-٧٢) الذي يبين دائرة وشكل الموجة على الحمل لمقوم محكوم ثلاثي الطور موجة كاملة مع حمل حثي ذو قيمة كبيرة. عندما تكون زاوية القدح تساوي $\left(\omega t = \frac{\pi}{6} + \alpha\right)$ يكون الثايروستور (T_6) في حالة توصيل سابقاً، والثايروستور (T_1) يكون مغلقاً. خلال الفترة الزمنية $\left(\frac{\pi}{6} + \alpha \le \omega t \le \frac{\pi}{2} + \alpha\right)$ يكون الثايروستورين (T_1, T_6) في حالة توصيل ويظهر جهد الخط (v_{ab}) على أطراف الحمل. عند الزاوية $\left(\omega t = \frac{\pi}{2} + \alpha\right)$ الثايروستور (T_2) يُقدح والثايروستور (T_6) مباشرةً يصبح عليه جهد انحياز عكسي وبالتالي يتم أطفاءه. خلال الفترة $\left(\frac{\pi}{2} + \alpha \le \omega t \le \frac{5\pi}{6} + \alpha\right)$ يكون كلاً من الثايرستورين (T_2, T_1) في حالة توصيل ويظهر جهد الخط (v_{ac}) على اطراف الحمل.

وأذا تّم ترقيم الثايرستورات حسب الشكل (٤-٧٢)، فإن تتابع التوصيل للثايروستورات يكون على الشكل التالي (١-٦، ١-٢، ٣-٢، ٣-٤، ٥-٤، ٥-٦). إذا كان جهد الطور الأول هو الجهد الأساسي فان علاقات الجهود الأخرى تكون منسوبة إلى هذا الجهد الأساسي وتعطى بالعلاقات التالية:-

$$V_{an} = V_m Sin\omega t$$

$$V_{bn} = V_m Sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$V_{cn} = V_m Sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

وتكون جهود الخط على النحو الآتي:-

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = \sqrt{3}V_m Sin(\omega t + \frac{\pi}{6})$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = \sqrt{3}V_m Sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = \sqrt{3}V_m Sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

القيمة المتوسطة لجهد الحمل تحسب من العلاقات التالية:-

$$V_{dc} = \frac{6}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} v_{ab} d\omega t$$

$$= \frac{3}{\pi}\int \sqrt{3} V_m Sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) d\omega t = \frac{3\sqrt{3}\ V_m}{\pi} Cos\alpha \qquad (4.97)$$

القيمة العظمى للقيمة المتوسطة لجهد الحمل عندما $(\alpha = 0)$ تعطى بالعلاقة التالية:-

$$V_{dm} = \frac{3\sqrt{3}\ V_m}{\pi} \qquad (4.98)$$

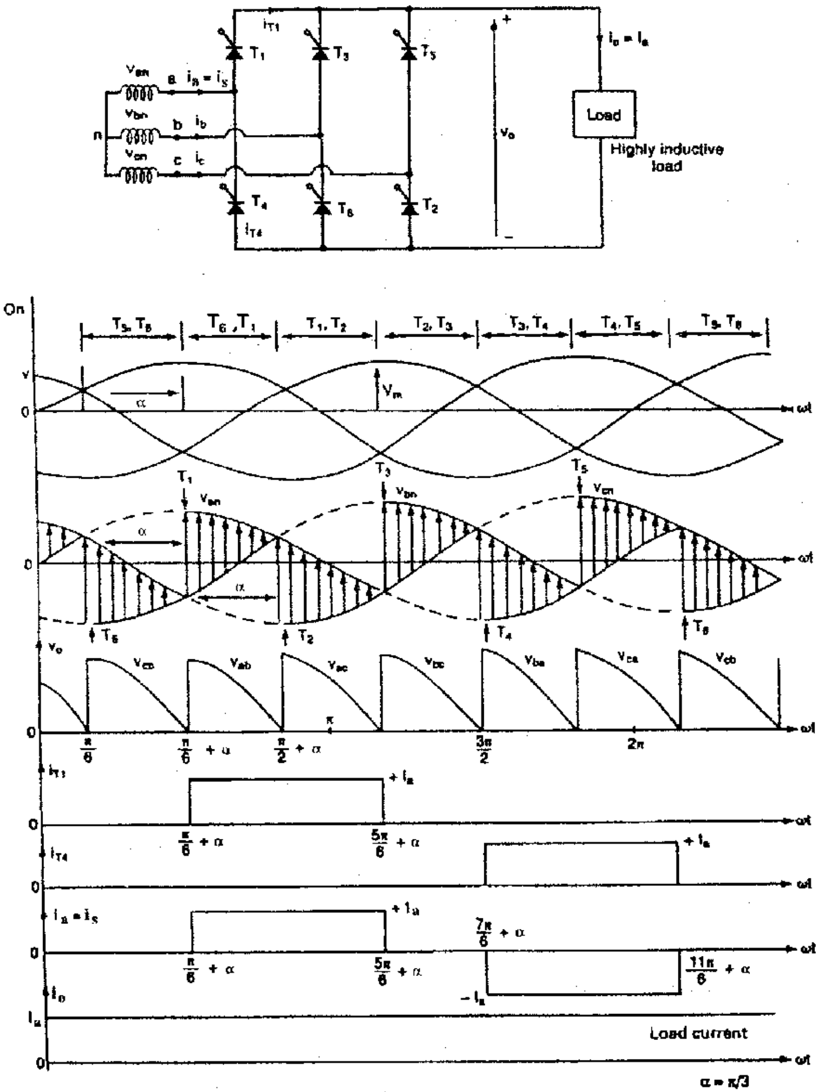
نسبة القيمة المتوسطة إلى القيمة العظمى للقيمة المتوسطة تسمي بالقيمة الاسمية لفولطية المخرج (Normalized Average Output Voltage):-

$$V_n = \frac{V_{dc}}{V_{dm}} = Cos\alpha \qquad (4.99)$$

القيمة الفعالة لجهد الحمل تعطى بالعلاقة التالية:-

$$V_R = \sqrt{\frac{6}{2\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} 3V_m^2\ \sin^2\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d\omega t}$$

$$= \sqrt{3}V_m\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4}\cos 2\alpha} \qquad (4.100)$$



الشكل (٤-٧٢)

شكل الموجة على الحمل لمقوم محكوم ثلاثي الطور موجة كاملة مع حمل حثي كبير

مثال(٤-١٥):- مقوم محكوم ثلاثي الطور موجة كاملة يعمل من خلال جهد ثلاثي الطور موصول بشكل نجمي له جهد خط $(208V)$ وتردد $(60Hz)$ وبحمل مـادي $(R=10\Omega)$. إذا كان المطلوب هو الحصول على قيمة متوسـطة لجهـد الحمـل تساوي (50%) من القيمة العظمى للقيمة المتوسطة لجهد الحمل المطلوب حـساب القيم التالية:-

١- زاوية القدح اللازمة للثايروستورات.

٢- القيمة المتوسطة والقيمة الفعالة لتيار الحمل.

٣-القيمة المتوسطة والقيمة الفعالة لتيار الثايروستور.

٤- مردود التقويم .

٥- معامل الاستخدام.

٦- معامل القدرة لدائرة الدخل.

الحـل:-

$$V_{ph}=\frac{V_L}{\sqrt{3}}=\frac{208}{\sqrt{3}}=120.1V$$

$$V_m=\sqrt{2}V_{ph}=169.83\ V$$

١-

$$V_n=0.5=\frac{V_{dc}}{V_{dm}}=Cos\alpha\Rightarrow\alpha=Cos^{-1}(0.5)=60^\circ=\frac{\pi}{3}$$

$$V_{dm}=\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi}=\frac{3\sqrt{3}\times169.83}{\pi}=280.9V$$

٢-

$$V_{dc}=50\%\ V_{dm}=0.5V_{dm}=0.5\times280.9=140.45\ \ V$$

$$I_{dc}=\frac{V_{dc}}{R}=\frac{140.45}{10}=14.05A$$

$$V_{rms}=\sqrt{3}V_m\sqrt{\frac{1}{2}+\frac{3\sqrt{3}}{4}Cos(2\alpha)}=\sqrt{3}\times169.83\sqrt{\frac{1}{2}+\frac{3\sqrt{3}}{4}Cos120}=159.29V$$

$$I_{rms}=\frac{V_{rms}}{R}=\frac{159.29}{10}=15.93A$$

٣- القيمة المتوسطة لتيار الثايروستور:- $I_{DT}=\frac{I_{dc}}{3}=\frac{14.05}{3}=4.68A$

القيمة الفعالة لتيار الثايروستور:- $I_{RT}=\frac{I_{rms}}{\sqrt{\frac{6}{2}}}=I_{rms}\sqrt{2/6}=9.2\ A$

٤- مردود التقويم :- $\eta=\frac{P_{dc}}{P_{ac}}=\frac{140.45\times14.05}{159.29\times15.93}=0.778=77.8\%$

٥- القيمة الفعالة لتيار الخط الثانوي للمحول (تيار ثايروستورين):-

$$I_S=\frac{I_{rms}}{\sqrt{\frac{6}{4}}}=I_{rms}\sqrt{2/3}=15.93\sqrt{2/3}=13A$$

$$P_{VA}=3V_SI_S=3\times120.1\times13=4683\ VA$$

معامل الاستخدام :- $TUF=\frac{P_{dc}}{P_{VA}}=\frac{140.45\times14.05}{4683.9}=0.421=42.1\%$

٦- القدرة الفعالة :- $P_o=I_{rms}^2.R=(15.93)^2\times10=2537.6W$

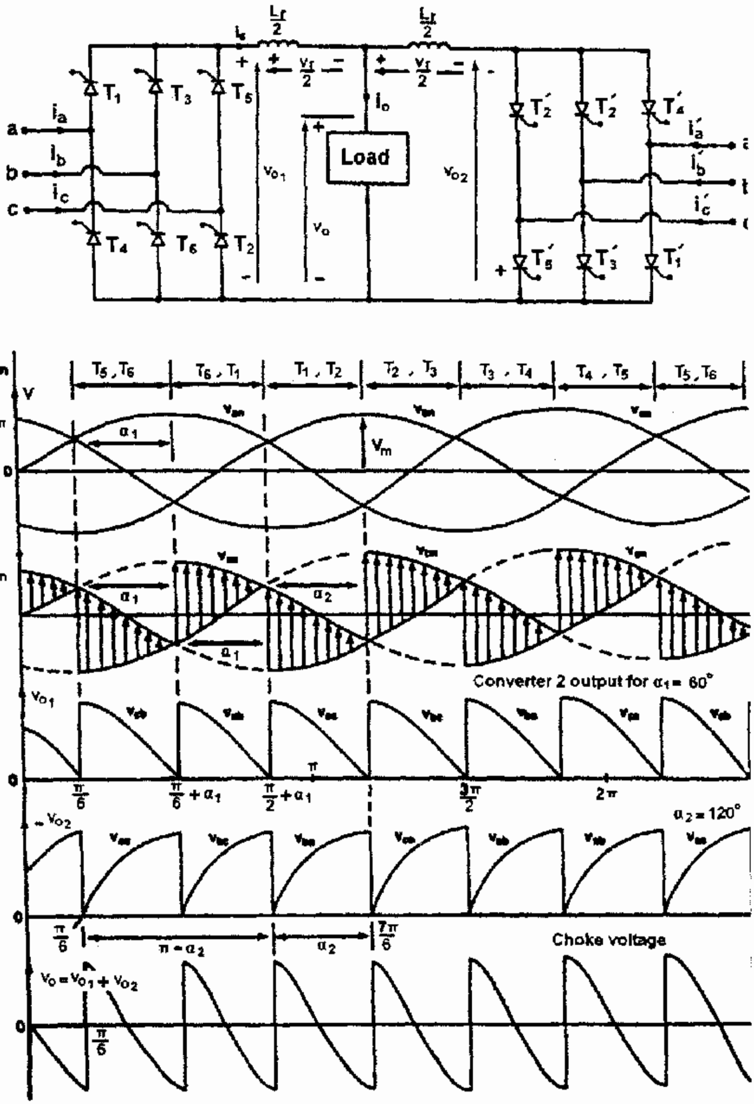
معامل القدرة لدائرة الدخل :- $PF=\frac{P_o}{P_{VA}}=\frac{2537.6}{4683}=0.542(Lagging)$

ملاحظة:- نلاحظ إن معامل القدرة اقل منه عند استخدام مقوم محكوم ثلاثي الطور نصفي واكبر منة عند استخدام مقوم محكوم ثلاثي الطور نصف موجة.

٤-٢-٦- المقوم المحكوم ثلاثي الطور مضاعف

Three-Phase Dual Converters

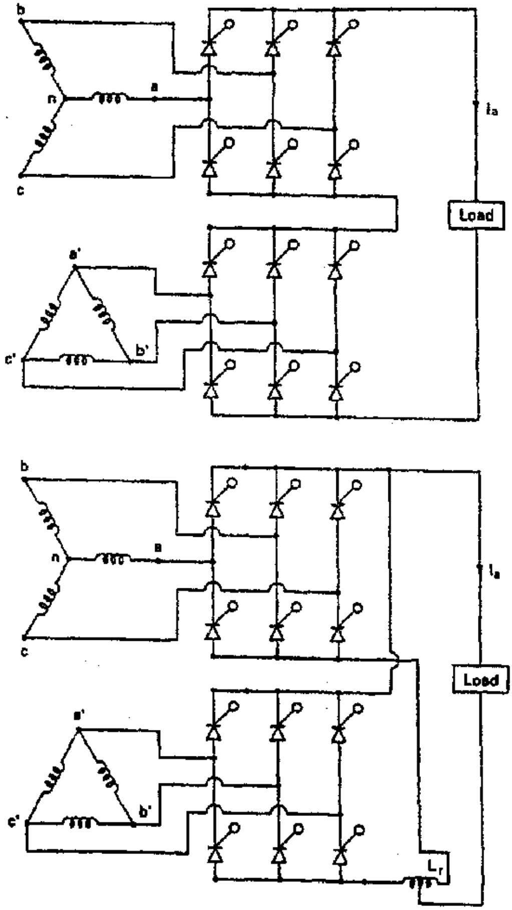
ويستخدم للتحكم بسرعة المحركات ضمن مناطق العمل الأربعة ويستخدم في التطبيقات ذات القدرات بحدود ($2000KW$) .ويتألف من مقومين محكومين ثلاثيً الطور موجة كاملة موصولين بشكل متعاكس. الملف (Lr) للتقليل من التيارات الدوارة، ($\alpha_2=\pi-\alpha_1$)، والشكل (٤-٧٣) يبين دائرة وشكل الموجة على الحمل لهذا النوع من المقومات المحكومة.



الشكل (٤-٧٣)

دائرة وشكل الموجة على الحمل لمقوم محكوم مضاعف ثلاثي الطور

يمكن وصل أكثر من مقوم محكوم ثلاثي الطور مع بعضها البعض كما هو مبين بالشكل (٤-٧٤).



الشكل (٤-٧٤)

وصل أكثر من مقوم محكوم ثلاثي الطور مع بعضها البعض

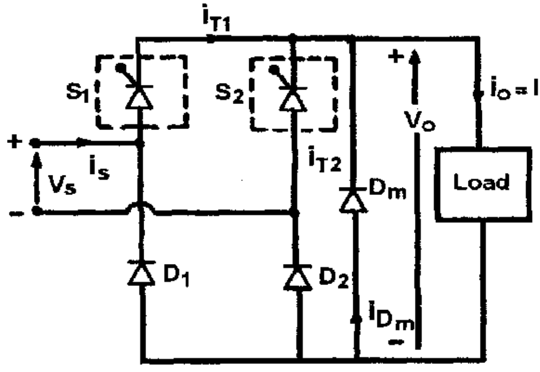
٤-٢-٧- تحسين معاملات القدرة لمحولات القدرة

معامل القدرة في دوائر التقويم المحكومة يعتمد بشكل أساسي على زاوية القدح(α) للثايروستورات المستخدمة في تلك المقومات المحكومة. ويكون معامل القدرة منخفض في الدوائر التي يكون جهد الخرج لها منخفض وهذه المقومات المحكومة تحتوي على توافقيات غير التوافقيات الأساسية في دوائر الحمل.

التحويل ألقسري يمكن أن يحسن من معامل القدرة ويعمل على تقليل (تخفيض) التوافقيات. طرق التحويل ألقسري المستخدمة في محولات القدرة يمكن تصنيفها إلى ما يلي:-

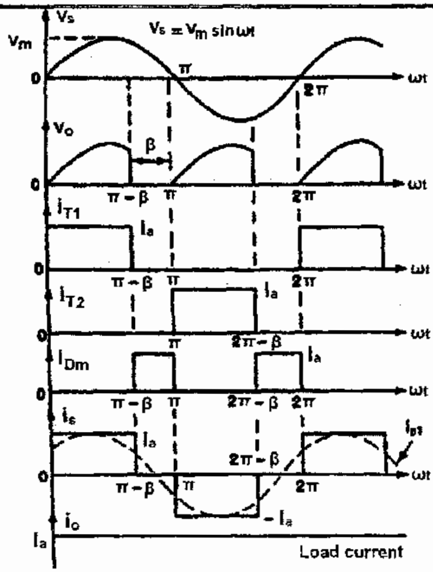
١- أستخدام دوائر قدح إضافية (Extinction Angle Control):-

الشكل (٤-٧٥) يبين استخدام هذه الطريقة في مقوم محكوم أحادي الطور نصفي. حيث يتم استبدال الثايروستورات المستخدمة بثايروستورات متحكم بإطفائها (Gate-Turnoff Thyrositors) ويمتاز هذا النوع من الثايروستورات عن الثايروستورات العادية (SCR) بأنه يمكن قدحها بواسطة تسليط نبضة موجبة على بوابتها ويمكن إطفاؤها بواسطة تطبيق نبضة سالبة على بوابتها.



الشكل (٤-٧٥-a)

مقوم محكوم أحادي الطور نصفي



الشكل (٤-٧٥-b) شكل الإشارات الخارجة

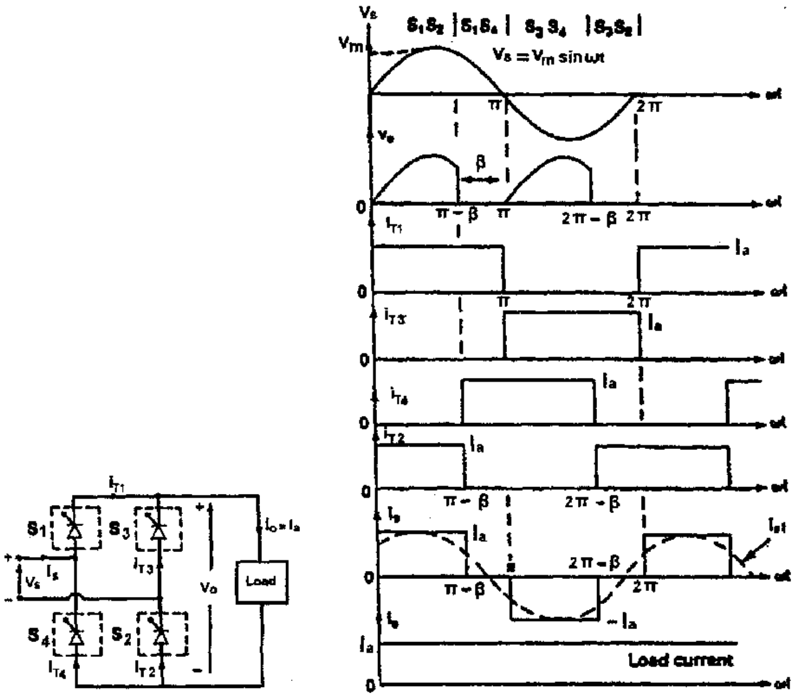
٢- أستخدام دوائر قدح متوافق (Symmetrical Angle Control):- حيث يتم قدح الثايروستور عند زاوية قدح مقدارها $\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ ويتم إطفاء الثايروستور عند زاوية مقدارها $\left(\frac{\pi+\alpha}{2}\right)$.

٣- التحويل باستخدام التحكم في عرض النبضة (Pulse-Width-Modulation Control (PWM)):- ويتم في هذه الطريقة قدح وإطفاء الثايروستور عدة مرات خلال نصف الموجة ويتم التحكم بجهد الخرج عن طريق تغيير عرض نبضة القدح.

٤- التحويل باستخدام التحكم في عرض الموجة الجيبية (Sinousidal Pulse-Width Modulation):- ويتم أيضا باستخدام عدد من النبضات خلال نصف الموجة، فعلى اعتبار أن عدد النبضات خلال نصف الموجة هو (P) نبضة، وهي بنفس العرض

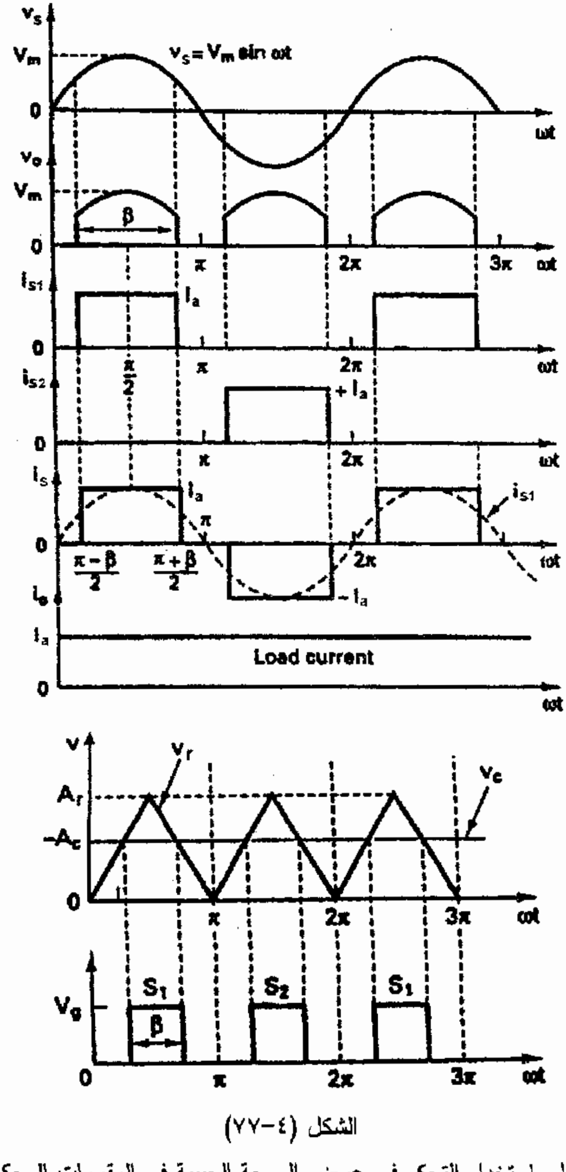
فيكون العرض الاعظمي لهذه النبضات يساوي $\left(\frac{\pi}{P}\right)$. ويمكــن اختيــار عــرض الموجة المناسبة من أجل التخلص من عدد التوافقيات غير الأساسية.

والاشكال (٤-٧٦) و (٤-٧٧) و (٤-٧٨) و (٤-٧٩) تبين أستخدام هذه الانواع من التحويل في المقومات المحكومة.



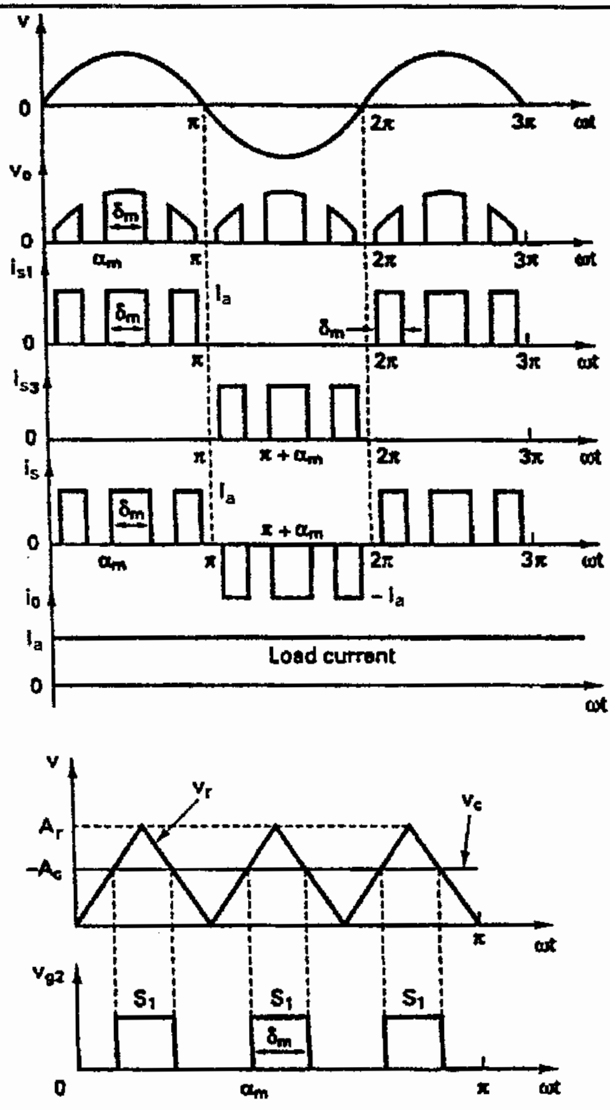
الشكل (٤-٧٦)

التحويل باستخدام التحكم في عرض الموجة الجيبية في المقومات المحكومة



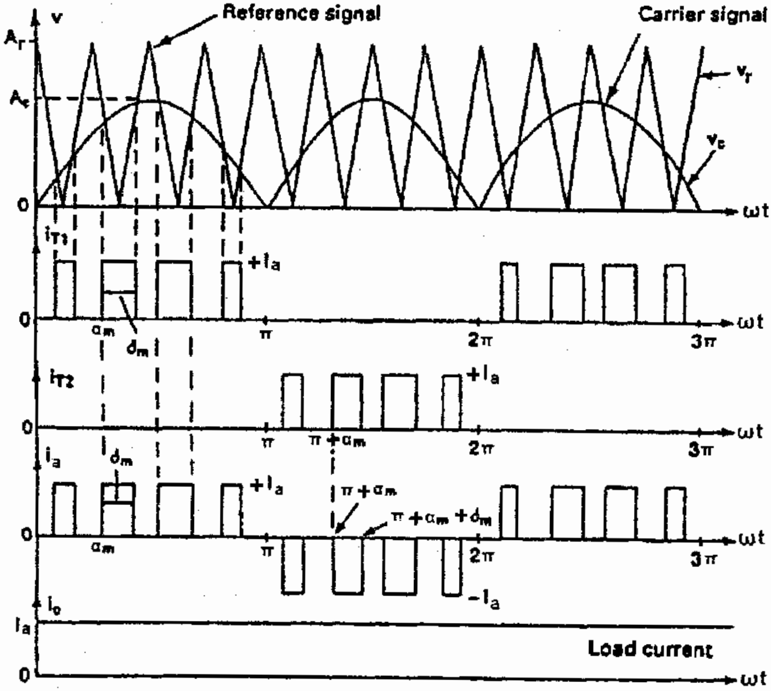
الشكل (٤-٧٧)

التحويل باستخدام التحكم في عرض الموجة الجيبية في المقومات المحكومة



الشكل (٤-٧٨)

التحويل باستخدام التحكم في عرض الموجة الجيبية في المقومات المحكومة



الشكل (٤-٧٩)

التحويل باستخدام التحكم في عرض الموجة الجيبية في المقومات المحكومة

٤-٣- تصميم دوائر المقومات المحكومة

من أجل تصميم دوائر المقومات المحكومة فانه يتطلب تحديد خواص الثايروستورات والديودات المستخدمة في تلك المقومات المحكومة. وأهم المحددات التي يجب أخذها بعين الاعتبار عند تصميم دوائر المقومات المحكومة تتلخص فيما يلي:

١- تحديد القيم العظمى للقيمة المتوسطة والقيمة الفعالة لتيار الثايروستور والديود.

٢- تحديد القيمة العظمى لجهد الانحياز العكسي للثايروستور والديود:- إن اختيار الثايروستور والديود المناسب يتم على أساس احتساب أسوء حالة لتلك العناصر ونختار الديود والثايرستور بحيث يتحمل هذه الحالة. ويتم ذلك عندما يعطي الثايروستور القيمة العظمى للقيمة المتوسطة (V_{dm}).

٣- جهد الخرج للمقوم المحكوم يحتوي على عدد من التوافقيات ويكون أسوء وضع لهذا الجهد عند القيمة الصغرى لجهد الخرج. ولذلك يجب تصميم المرشحات عند القيم الصغرى لجهد الخرج.

مثال (٤-٧):- مقوم محكوم ثلاثي الطور موجة كاملة يعمل من خلال مصدر جهد ثلاثي الطور جهد الخط له يساوي $(230V)$ وتردده $(60\ Hz)$ الحمل عبارة عن حمل حثي قيمته عالية، القيمة المتوسطة للتيار هي $(I_{dc}=150A)$ إذا كانت زاوية القدح هي $\left(\alpha=\frac{\pi}{3}\right)$ المطلوب حساب محددات الثايروستور.

$$V_{ph}=\frac{V_L}{\sqrt{3}}=\frac{230}{\sqrt{3}}=132.79V$$

$$V_m=\sqrt{2}V_{ph}=\sqrt{2}\times132.79=187.79V$$

$$V_{dc}=\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi}Cos\alpha=\frac{3\sqrt{3}\times187.79}{\pi}Cos\left(60^{\circ}\right)=155.3V$$

$$P_{dc}=V_{dc}I_{dc}=155.3\times150=23295W$$

القيمة المتوسطة لتيار الثايروستور:-

$$I_{DT} = \frac{I_{dc}}{3} = \frac{150}{3} = 50A$$

القيمة الفعالة لتيار الثايروستور :-

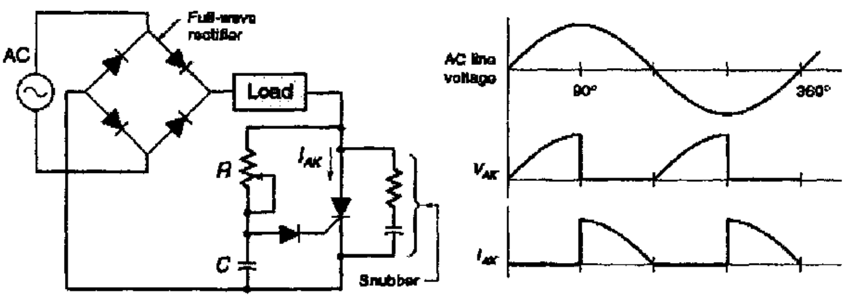
$$I_{RT} = \frac{150}{\sqrt{3}} = 86.6A$$

القيمة العظمى للتيار خلال الثايروستور(أكبر قيمة للقيمة المتوسطة للتيار):-

$$I_{PT} = 150A$$

$$PIV = \sqrt{3}V_m = \sqrt{3} \times 187.79 = 325.27V$$

مثال (٤-١٦):- محرك كهربائي بمعطيات تيار $(15A)$ وجهد $(120Vdc)$ يُغذى من دائرة كما في الشكل (٤-٨٠)، مصدر القدرة $(120Vac)$. المطلوب اختيار المقوم السلكونى المحكوم (SCR)، من أجل هذه الوظيفة من القائمة المعطاة في الشكل (٤-٨١).



الشكل (٤-٨٠)

الحـــل:-

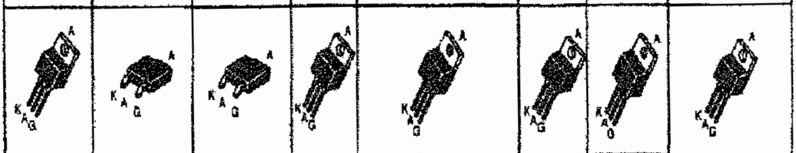
بما أن المحرك ذو تيار ثابت فانه يأخذ ألقدره على شكل نبضات مـــن تقـــويم مصدر الـــ (AC).

ويمكن حساب فولتية الذروة كما يلي:

$$V_{peak} = \frac{120}{0.707} = 170\ V$$

تيار ثابت $(15A)$ يكافئ $(15A_{rms})$، لذا بالنظر الى الاختيارات المتوفرة في الشكل (٤-٨١)، فإننا نختار (SCR) ذو تيار $(16\ A)$ لأن التيـــار المطلـــوب $(15A_{rms})$ لذلك نأخذ قيمة أكبر منه. والفولتية العظمي هي $(170V)$ ولكن بالنظر الى الجدول فإن اقرب قيمة للفولطية هي القيمة (400 V) وبذلك يكون رقم المقوم الـــسليكوني (SCR) هو $(2N6403)$ الاختيار الصائب.

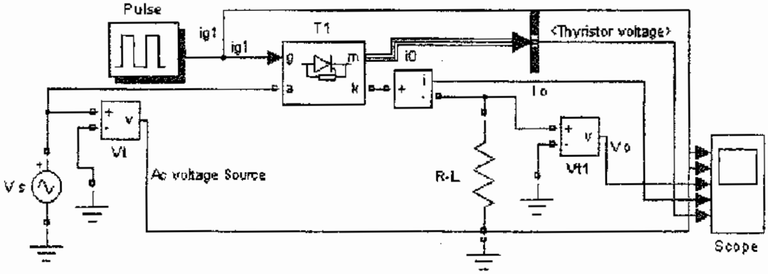
SCRs — General Purpose Plastic Packages (continued)

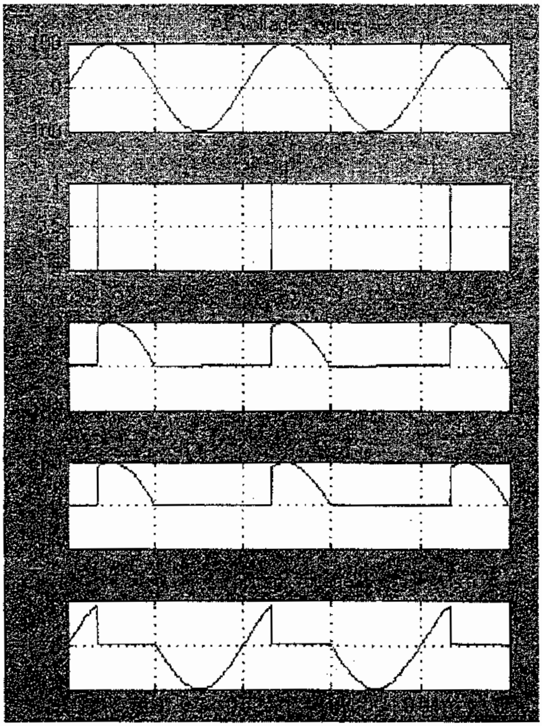
	On–State (RMS) Current									
	10 AMPS	12 AMPS					16 AMPS		25 AMPS	
	T_C = 75°C	T_C = 90°C	T_C = 75°C	T_C = 90°C	T_C = 80°C		T_C = 90°C	T_C = 80°C	T_C = 85°C	
										
	Sensitive Gate		Sensitive Gate		High Performance			High Performance		
V_{DRM} V_{RRM} (Volts)	Case 221A–07 TO–220AB Style 3	DPAK Case 369A–13 Style 4		Case 221A–07 TO–220AB Style 3	Case 221A–09 TO–220AB Style 3		Case 221A–07 TO–220AB Style 3	Case 221A–09 TO–220AB Style 3	Case 221A–07 TO–220AB Style 3	
50	—	—	—	2N6394	—	—	2N6400	—	2N6504	MCR69–2
100	—	—	—	2N6395	—	—	2N6401	—	2N6505	MCR69–3
200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
400	MCR12LD(2)	—	—	2N6397	MCR12D(2)	—	2N6403	MCR25D(2)	2N6507	—
600	MCR12LM(2)	MCR12DCM(4)	MCR12DSM(4)	2N6398	MCR12M(2)	—	2N6404	MCR25M(2)	2N6508	—
800	MCR12LN(2)	MCR12DCN(4)	MCR12DSN(4)	2N6399	MCR12N(2)	MCR16N(2)	2N6405	MCR25N(2)	2N6509	—
Maximum Electrical Characteristics										

الشكل (٤-٨١)

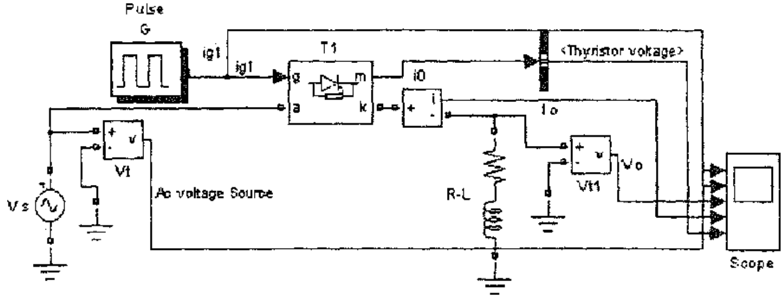
٤-٤- الدوائر العملية والحل الرياضي باستخدام برنامج (Math – Lab) للمقــوم المحكوم:-

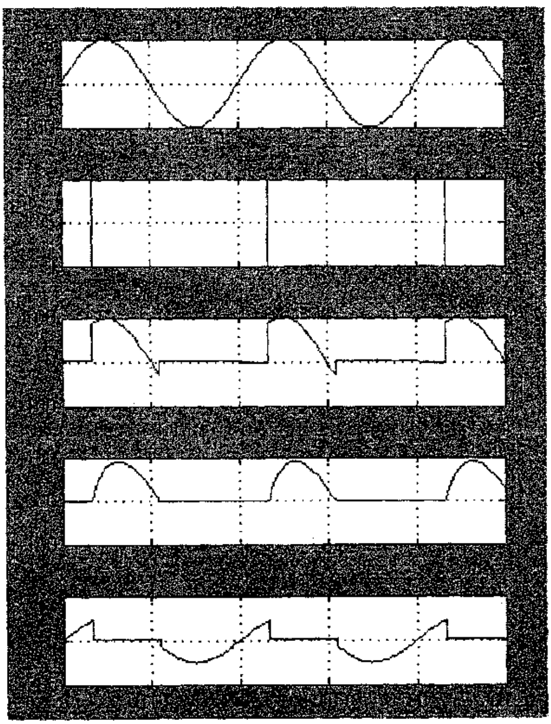
٤-٤-١- دائرة تقويم أحادي الطور محكوم نصف موجة (حمل مادي)



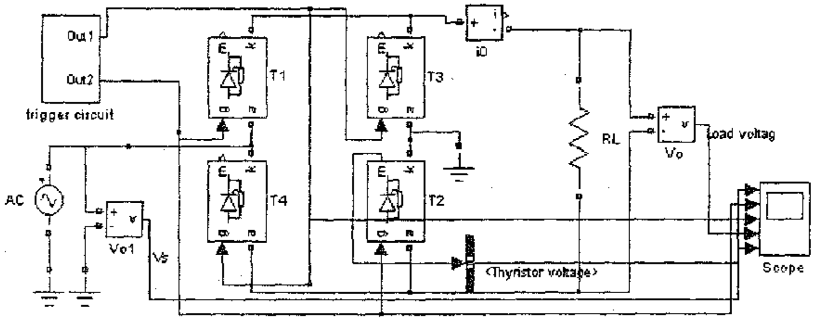


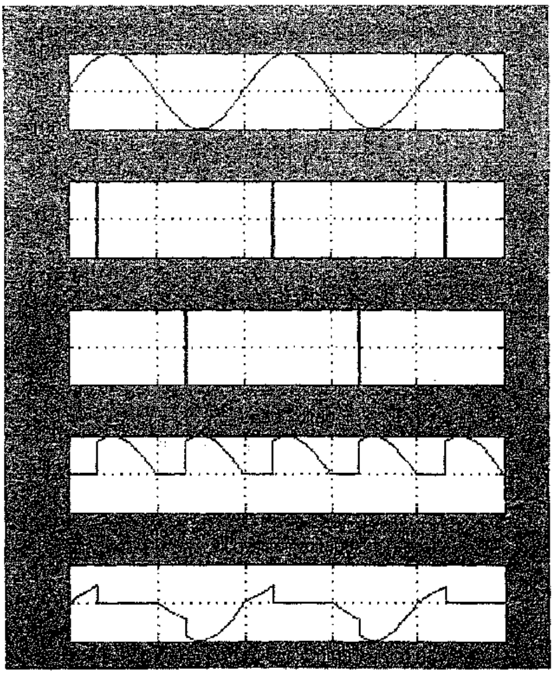
٤-٤-٢- دائرة تقويم أحادي الطور محكوم نصف موجة (حمل مادي حثي)



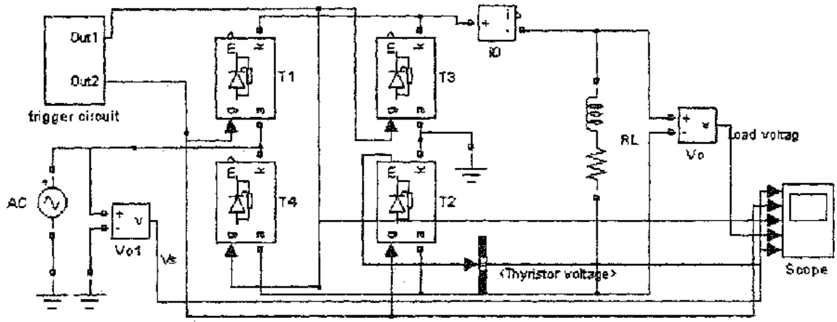


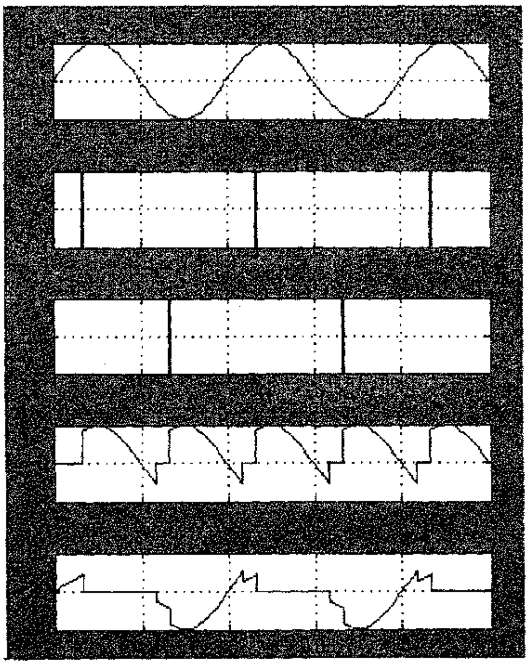
٤-٤-٣- دائرة تقويم أحادي الطور محكوم موجة كاملة (حمل مادي)



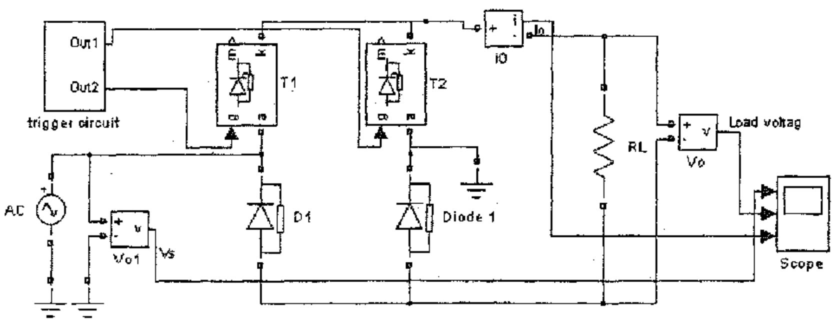


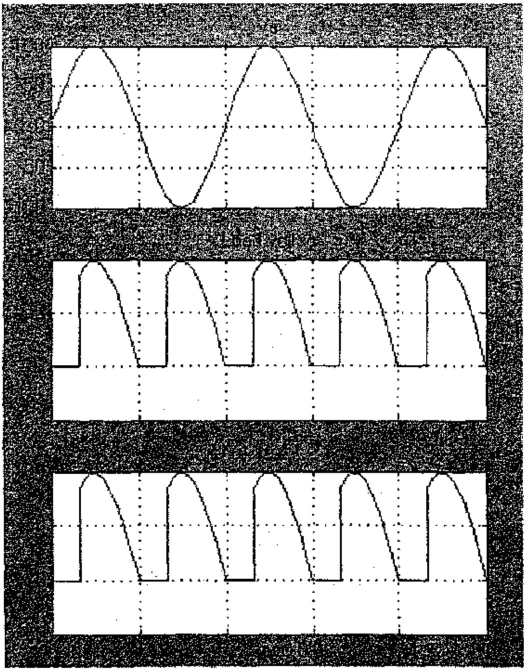
٤-٤-٤- دائرة تقويم أحادي الطور محكوم موجة كاملة (حمل مادي حثي)



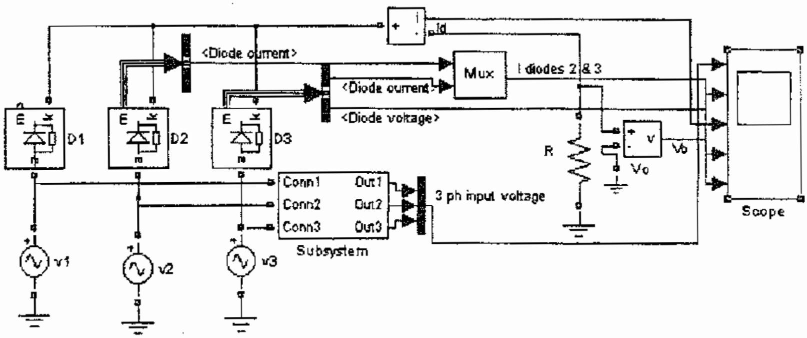


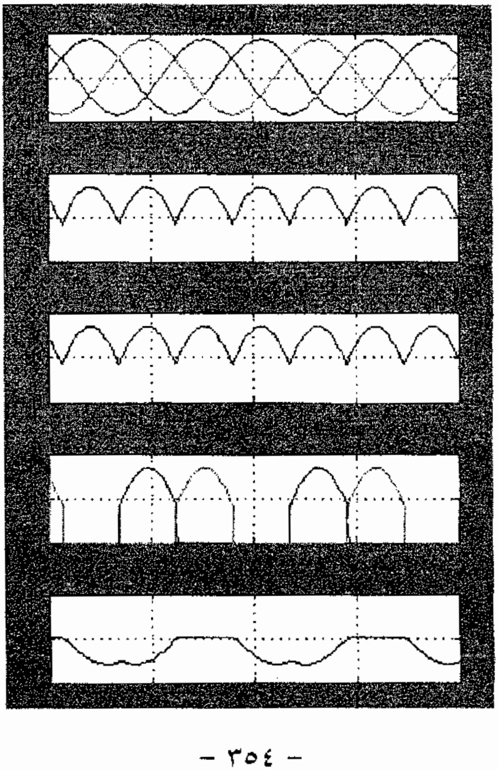
٤-٤-٥- دائرة تقويم أحادي الطور محكوم نصفي موجة كاملة (حمل مادي)



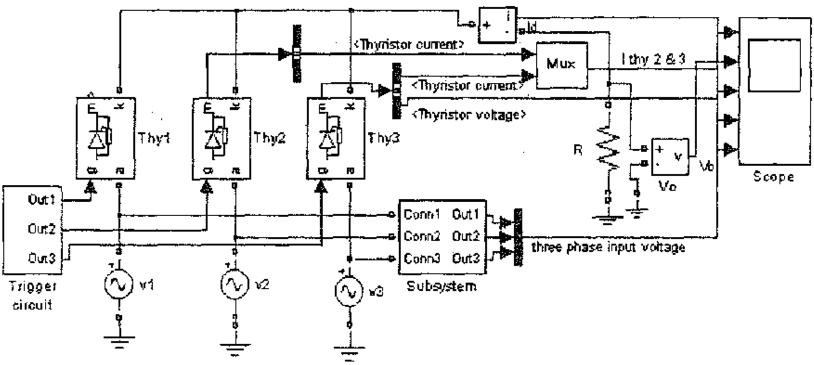


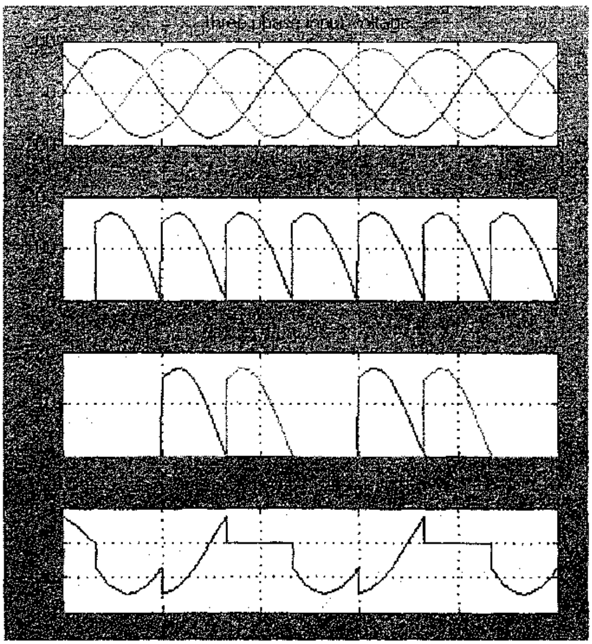
٤-٤-٦- دائرة تقويم ثلاثي الطور نصف موجة (حمل مادي)



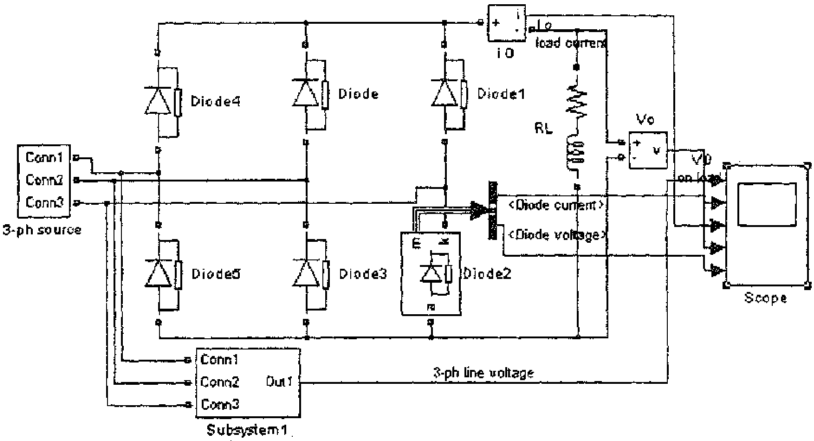


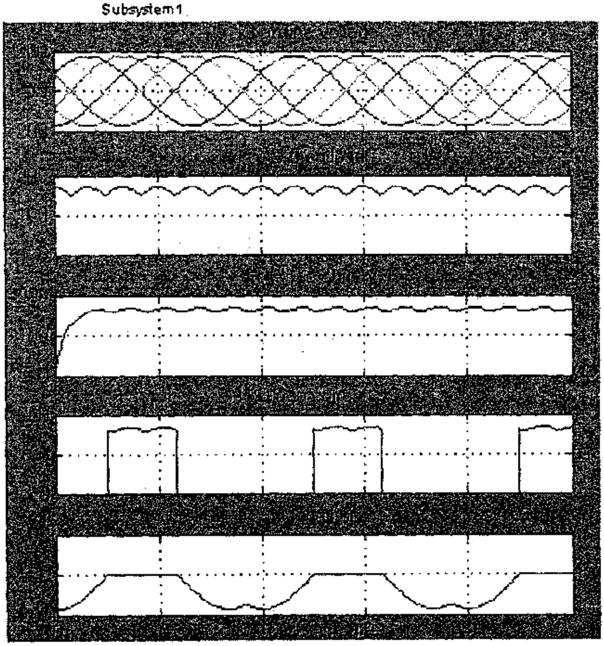
٤-٤-٧- دائرة تقويم ثلاثي الطور محكوم نصف موجة (حمل مادي)



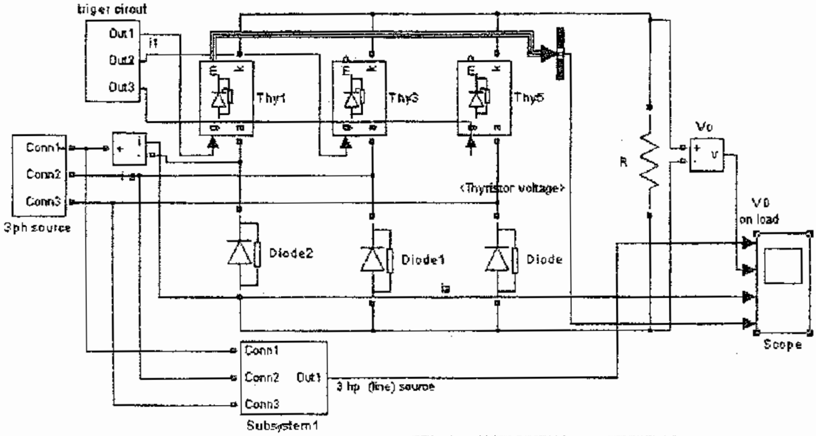


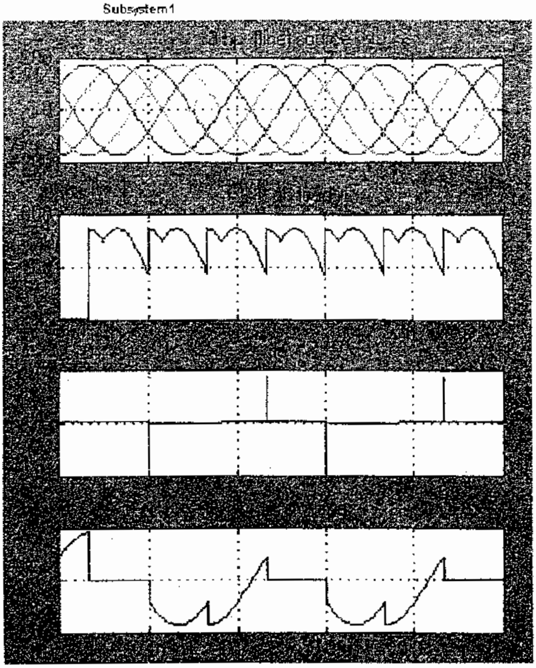
٤-٤-٨- دائرة تقويم ثلاثي الطور موجة كاملة (حمل مادي حثي)



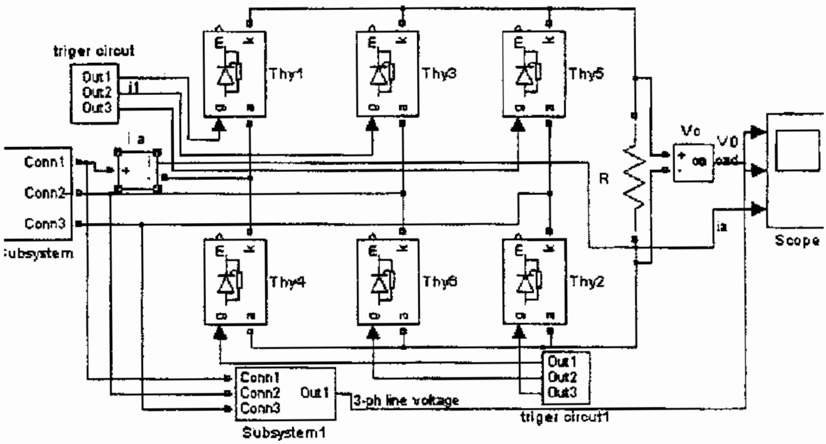


٤-٤-٩- دائرة تقويم ثلاثي الطور محكوم نصفي موجة كاملة (حمل مادي)





٤-٤-١٠- دائرة تقويم ثلاثي الطور محكوم موجة كاملة (حمل مادي)



الوحدة الخامسة

متحكمات الجهد المتناوب

الوحدة الخامسة

متحكمات الجهد المتناوب

Ac Voltage Controller

إذا تم وصل ثايرستور بحيث يعمل كمفتاح في دائرة إلكترونية، حيث يعمل هذا الثايروستور كمفتاح بين مصدر التغذية والحمل. ففي هذه الحالة يمكن التحكم بتدفق القدرة إلى الحمل عن طريق تغيير القيمة الفعالة للجهد المطبق على الحمل. وتدعى هذه الدوائر المستخدمة لهذه الغاية بمتحكمات الجهد. ومن أهم الاستخدامات لهذا النوع من المتحكمات استخدامها في دوائر التسخين الصناعي وفي متحكمات الإنارة وفي التحكم في سرعات المحركات الحثية.

ومن اجل نقل القدرة إلى الحمل يستخدم نوعين من أنواع التحكم بشكل واسع وهما:-

١- التحكم في عملية الفصل والوصل (ON-OFF Control):- يقوم الثايروستور بوصل القدرة إلى الحمل خلال عدد من الدورات لمصدر التغذية، ويقوم بفصل هذه القدرة خلال عدد آخر من الدورات.

٢- التحكم في زاوية فرق الطور (Phase-Angle Control):- يقوم الثايروستور بوصل القدرة إلى الحمل خلال جزء من الدورة لمصدر التغذية، بينما يقوم بفصل القدرة خلال الجزء الآخر من الدورة.

وتقسم دوائر متحكمات الجهد إلى قسمين أساسيين هما:-

١- دوائر متحكمات جهد أحادية الطور:- وهي بدورها تقسم إلى قسمين أساسيين هما:-

أ- دوائر متحكمات جهد أحادية الطور نصف موجة.

ب- دوائر متحكمات جهد أحادية الطور موجة كاملة.

٢- دوائر متحكمات جهد ثلاثية الأطوار:- وهي بدورها تقسم إلى قسمين أساسيين هما :-

أ- دوائر متحكمات جهد ثلاثية الأطوار نصف موجة.

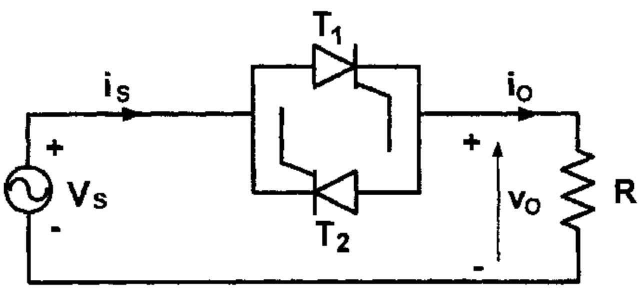
ب- دوائر متحكمات جهد ثلاثية الأطوار موجة كاملة.

وهنالك أنواع مختلفة من دوائر متحكمات الجهد ثلاثية الأطوار وذلك حسب طريقة توصيل هذه المتحكمات (التوصيل النجمي أو التوصيل المثلثي).

من أجل التطبيقات ذات الترددات العالية (**400** Hz) يستخدم الترياك بدل الثايروستور في هذا النوع من المتحكمات. وبما أن الجهد المطبق (جهد المصدر) هو جهد متناوب فإن عملية التبديل في الثايروستور تكون من نوع التبديل الطبيعي (Natural Commutation).

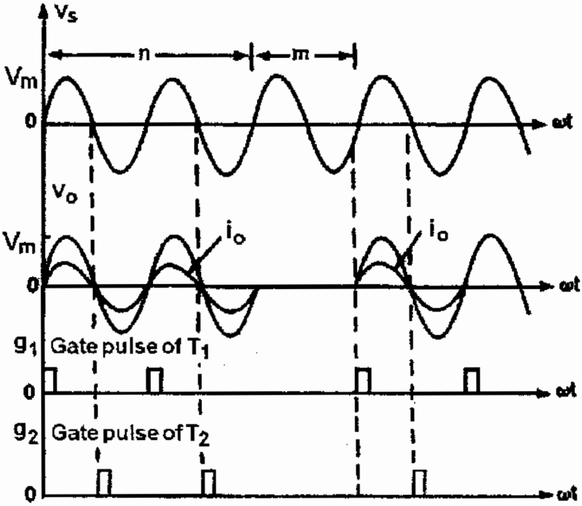
٥-١- متحكمات الجهد التي تستخدم عملية التحكم بالوصل والفصل
ON-OFF Control

يمكن شرح مبدأ العمل لهذه المتحكمات بأخذ دائرة متحكم جهد أحادي الطور موجة كاملة كما هو مبين في الشكل (٥-١).



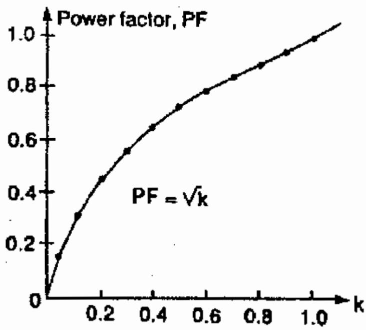
الشكل (٥-١-a)

الدائرة الكهربائية لمتحكم جهد



الشكل (٥-١-b)

إشارات القدح في حالة الوصل لمتحكم جهد



الشكل (٥-١-c)

العلاقة بين زمن الدورة ومعامل القدرة

يوصل الثايروستور الحمل مع مصدر التغذية لـزمن (t_n) ويـتم فـصل الثايروستور بواسطة نبضة زمنها (t_0). وزمن الوصل للثايروستور يكـون فـي

العادة مؤلف من عدد من النبضات. ويتم تحويل الثايروستور إلى حالة التوصيل عند مرور جهد المصدر بالنقاط التي يساوي فيها هذا الجهد الصفر.

بإستخدام نبضات القدح للثايروستورات عند بداية الموجات يؤدي إلى تخفيض التوافقيات الناتجة عن عملية الفصل والوصل.

من اجل جهد مدخل جيبي $V_S = V_m \, Sin\omega t = \sqrt{2}\, V_{ph} \, Sin\omega t$، أذا تم وصل جهد المدخل مع الحمل لعدد (n) من الدورات وتم فصل الحمل لعدد (m) من الدورات، فإن القيمة الفعالة لجهد الخرج تعطى بالعلاقة التالية:-

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{n}{2\pi(n+m)} \int_0^{2\pi} 2V_{ph}^2 \; Sin^2\omega t \, d\omega t}$$

$$= V_{ph}\sqrt{\frac{n}{n+m}} = V_{ph}\;\sqrt{K} \qquad (5.1)$$

حيث:- K :- مقدار ثابت يدعى $(duty \;\; cycle)$ ويساوي:-

$$K = \frac{n}{n+m} \qquad (5.2)$$

ومن الملاحظ أن خواص هذه الدوائر تشبه خواص المقومات المحكومة.

مثال (٥-١):- متحكم جهد أحادى الطور موجة كاملة موصول مع حمل مادي $(R = 10\Omega)$، والقيمة الفعالة لجهد الطور $(V_{ph} = 120V)$ وتردده $(f = 60Hz)$.

والثايرستور يوصل لفترة $(n = 25\,cycle)$ ويفصل لفترة $(m = 75\,cycle)$.

المطلوب:-

١- حساب القيمة الفعالة لجهد الخرج.

٢- حساب عامل القدرة لدائرة الدخل.

الحل:-

$$K = \frac{n}{n+m} = \frac{25}{25+75} = 0.25$$

$$V_m = \sqrt{2}V_{ph} = \sqrt{2} \times 120 = 169.7V$$

$$V_{rms} = V_{ph} \times \sqrt{K} = 120 \times \sqrt{0.25} = 60V$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{60}{10} = 6A$$

$$P_o = I_{rms}^2 \times R = 360Watt$$

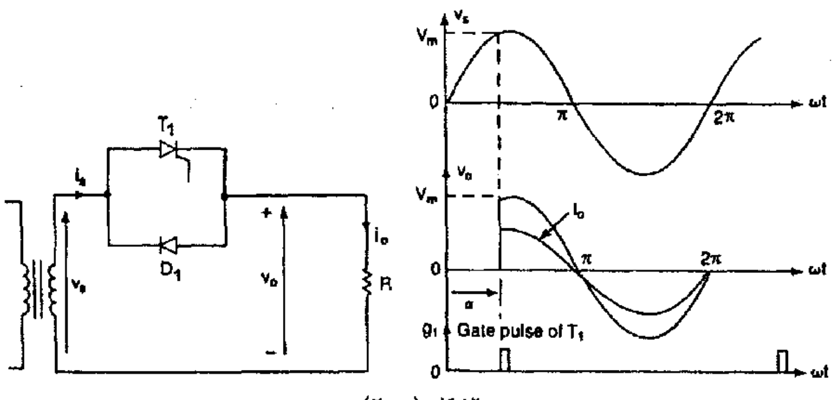
$$P_{VA} = V_{ph} \times I_S = V_s \times I_{rms} = 120 \times 6 = 720Watt$$

$$PF = \frac{P_o}{P_{VA}} = \sqrt{\frac{n}{n+m}} = \sqrt{K} = \sqrt{0.25} = \frac{360}{720} = 0.5 \quad (Lagging)$$

٥-٢- متحكمات الجهد التي تستخدم التحكم بزاوية فرق الطور

Principle of Phase Control

يمكن شرح مبدأ العمل بأخذ الدائرة المبينة في الشكل (٥-٢) على سبيل المثال (دائرة متحكم جهد أحادى الطور نصف موجة).



الشكل (٥-٢)

دائرة متحكم جهد أحادى الطور نصف موجة وشكل الإشارة الخارجة

يتم التحكم في تدفق القدرة إلى الحمل عن طريق التحكم في زاوية القدح للثايروستور (T_1). ونتيجة وجود الديود (D_1) فان تدفق القدرة يكون بحدود $[(70.7 \rightarrow 100)\%]$ من جهد المصدر. موجة الجهد والتيار متماثلتين وتحتوي على مركبة (DC). دائرة متحكم الجهد نصف موجة تكون مناسبة فقط للأحمال ذات القدرات المنخفضة مثل أنظمة التسخين والإضاءة. تتم عملية التحكم بتدفق القدرة خلال النصف الموجب من موجة الدخل، لذلك يسمى هذا النوع من المتحكمات بالتحكم وحيد الاتجاه (Unidirectional Controller).

إذا كانت موجة الجهد المطبقة موجة جيبيه $v = V_m Sin\,\omega t = \sqrt{2}V_{ph} Sin\,\omega t$ وكانت زاوية القدح للثايروستور هي (α)، فإن القيمة الفعالة لجهد الخرج تعطى بالعلاقة:-

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\left[\int_{\alpha}^{\pi} 2V_{ph}^2 Sin^2 \omega t \; d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} 2V_{ph}^2 Sin^2 \omega t \; d(\omega t)\right]}$$

$$= V_{ph}\sqrt{\frac{1}{2\pi}\left(2\pi - \alpha + \frac{Sin 2\alpha}{2}\right)} \qquad (5.3)$$

والقيمة المتوسطة لجهد الحمل تعطى بالعلاقة:-

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi}\left[\int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}V_{ph} Sin\,\omega t \; d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} \sqrt{2}V_{ph} Sin\,\omega t \; d(\omega t)\right]$$

$$= \frac{\sqrt{2}V_{ph}}{2\pi}\left[Cos\,\alpha - 1\right] \qquad (5.4)$$

إذا تغيرت قيمة (α) من (0) إلى (π) فان القيمة الفعالة للجهد (V_{rms}) تتغير من (V_{ph}) إلى $\left(\frac{V_{ph}}{\sqrt{2}}\right)$ والقيمة المتوسطة للجهد تتغير من (0) إلى $\left(-\frac{\sqrt{2}V_{ph}}{\pi}\right)$.

مثال (٥-٢):- متحكم جهد أحادي الطور نصف موجة موصول مع حمل مـــادي $(R=10\Omega)$ وجهد مصدر التغذية $(V_S=120V)$ وتردده $(f=50Hz)$. إذا كانت زاوية القدح للثايروستور $\left(\alpha=\frac{\pi}{2}\right)$ أوجد ما يلي:-

١- القيمة الفعالة لجهد الحمل.

٢- معامل القدرة لدائرة الدخل.

٣- القيمة المتوسطة لتيار الدخل.

الحل :-

١-

$$V_m=\sqrt{2}\,V_S=\sqrt{2}\times 120=169.7V$$

$$V_{rms}=V_{ph}\sqrt{\frac{1}{2\pi}\left(2\pi-\frac{\pi}{2}+\frac{Sin\,\pi}{\pi}\right)}=V_{ph}\sqrt{\frac{3}{4}}=120\times\sqrt{\frac{3}{4}}=103.92V$$

٢-

$$I_{rms}=\frac{V_{rms}}{R}=\frac{103.92}{10}=10.392A$$

$$P_o=I_{rms}^2\times R=(10.392)^2\times 10=1079.94\quad Watt$$

$$I_{rms}=I_s$$

$$P_{VA}=V_S\times I_S=120\times 10.392=1247.04\quad VA$$

$$PF=\frac{P_o}{P_{VA}}=\sqrt{\frac{3}{4}}=0.866\quad (Lagging)$$

$$V_{dc}=\frac{\sqrt{2}V_{ph}}{2\pi}\left[Cos\,\alpha-1\right]=-\frac{\sqrt{2}V_{ph}}{2\pi}=-27\ V$$

$$I_{dc}=\frac{V_{dc}}{R}=-\frac{27}{10}=-2.7A$$

ملاحظة:- إشارة الناقص للقيمة المتوسطة للجهد والتيار تعني أن تيار الدخل في الجزء الموجب للموجة هو اقل منة للنصف السالب من الموجة. وهذا النوع من المتحكمات (متحكم الجهد وحيد الاتجاه) لا يستخدم بشكل واسع.

٥-٣- متحكمات الجهد أحادية الطور:-

Single Phase Ac Voltage Controller

٥-٣-١- متحكمات الجهد أحادية الطور نصف موجة:-

Half Wave Single Phase AC Voltage Controller

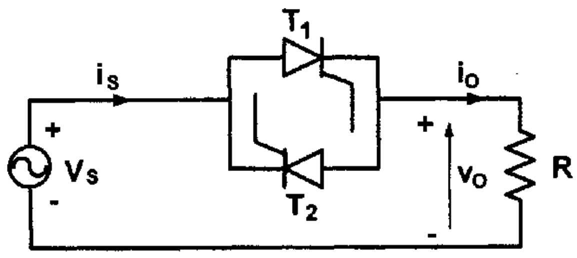
ويسمى هذا النوع بمتحكمات الجهد أحادية الطور وحيدة الاتجاه (Unidirectional)، والتي تم شرحها في فقرة متحكمات الجهد التي تستخدم التحكم بزاوية فرق الطور.

٥-٣-٢- متحكمات الجهد أحادية الطور موجة كاملة :-

Full Wave Single Phase AC Voltage Controller

وهو متحكم جهد يتألف من ثايرستورين موصولين بشكل متعاكس، ويطلق عليها احياناً بمتحكمات الجهد ثنائية الإتجاه (Bi-Directional)، كما هو مبين في الشكل (٥-٣-a). دائرة متحكم جهد موجة كاملة بحمل مادي.

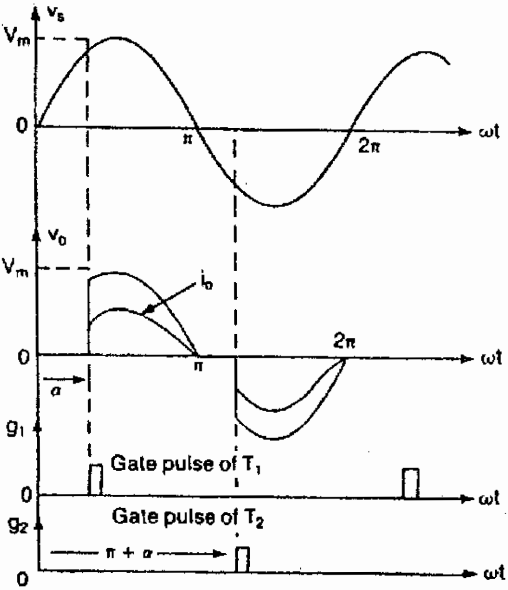
خلال النصف الموجب لموجة الدخل يتم التحكم بتدفق القدرة إلى الحمل من خلال التحكم بزاوية القدح للثايروستور (T_1)، ويقوم الثايروستور (T_2) بالتحكم بتدفق القدرة خلال الجزء السالب من موجة الدخل.



الشكل(٥-٣-a) دائرة متحكم جهد موجة كاملة بحمل مادي

يوجد هناك فرق في الطور بين زاوية قدح الثايروستور (T_1) وزاوية قدح الثايروستور (T_2)، مقدارها (180°).

يبين الشكل (٥-٣-b) أشكال موجة الدخل وموجة الخرج ونبضات القدح للثايرستورين.



الشكل(٥-٣-b)

أشكال موجة الدخل وموجة الخرج ونبضات القدح للثايروستورين

إذا كانت موجة الدخل تعطى بالعلاقة التالية:-

$$v(t) = V_m Sin\omega t$$

وكانت زوايا القدح للثايروستورين $(\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha)$، فإن القيم الفعالة لجهد الخرج تعطى بالعلاقة:-

$$V_{rms}=\sqrt{\frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi}V_m^2 Sin^2\omega t\ d(\omega t)}=\sqrt{\frac{2V_m^2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi}Sin^2\omega t\, d(\omega t)}$$

$$=\frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\pi-\alpha+\frac{Sin2\alpha}{2}\right)} \qquad (5.5)$$

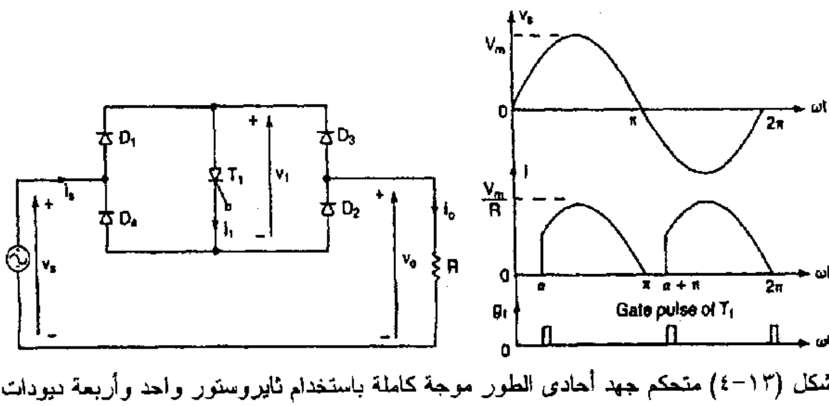
وتعطى القيمة المتوسطة لجهد الخرج بالعلاقة:-

$$V_{dc}=\frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi}V_m Sin\omega t\, d\omega t=\frac{V_m}{\pi}\left[Cos\alpha+1\right] \qquad (5.6)$$

إذا تغيرت قيمة(α) من (0) إلى (π) فان قيمة (V_{rms}) تتغير من $\left(\frac{V_m}{\sqrt{2}}\right)$ إلى (0).

$$\alpha=0\Rightarrow V_{rms}=\frac{V_m}{\sqrt{2}}\ ,\ \alpha=\pi\Rightarrow V_{rms}=0$$

وفي الدائرة السابقة لابد من عزل زاوية القدح للثايروستور (T_1) عن زاوية القدح للثايروستور (T_2). كما يمكن الحصول على دائرة متحكم جهد أحادى الطور موجة كاملة باستخدام ثايروستور واحد وأربعة ديودات موصولة على شكل مقوم جسري كما هو مبين في الشكل (٥-٤).



الشكل (١٣-٤) متحكم جهد أحادى الطور موجة كاملة باستخدام ثايروستور واحد وأربعة ديودات

حيث تقوم الديودات في هذه الدائرة بتقويم جهد الدخل ويكون جهد الخرج في هـــذه الحالة عبارة عن جهد وحيد الاتجاه (Unidirectional) .

مثال (٥-٣):- دائرة متحكم جهد أحادى الطــور موجــة كاملــة بحمــل مــادي $(R = 10\Omega)$ وجهد الدخل $(V_S = 120V)$ بتردد $(f = 50Hz)$.
إذا كانـــت زاويـــة القـــدح للثايروســـتورين (T_1, T_2) متـــساوية وتـــساوي إلـــى $\left(\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha = \frac{\pi}{2}\right)$ المطلوب حساب:-

١- القيمة الفعالة لجهد الخرج. ٢ - معامل القدرة لدائرة الدخل.

٣- القيمة الفعالة والقيمة المتوسطة لتيار الثايروستورات.

الحل:-

$$V_m = \sqrt{2}V_m = \sqrt{2} \times 120 = 169.7V$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\pi - \alpha + \frac{Sin2\alpha}{2}\right)} = \frac{169.7}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\pi - \frac{\pi}{2} + \frac{Sin\pi}{2}\right)} = 84.85V$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{84.85}{10} = 8.485A$$

$$P_o = I_{rms}^2 \times R = (8.485)^2 \times 10 = 719.95 \quad Watt$$

$$I_S = I_{rms} = 8.485A$$

$$V_S = 120V$$

$$P_{VA} = V_S \times I_S = 8.485 \times 120 = 1018.2 \quad VA$$

$$PF = \frac{P_o}{P_{VA}} = \frac{719.95}{1018.2} = 0.707 \qquad (Lagging)$$

القيمة المتوسطة للجهد :-

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi}\left[Cos\alpha + 1\right] = \frac{V_m}{\pi} = \frac{169.7}{\pi} = 54 \quad V$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = 5.4A$$

القيمة المتوسطة للتيار في الثايروستور :-

$$I_{DT} = \frac{I_{dc}}{2} = 2.7A$$

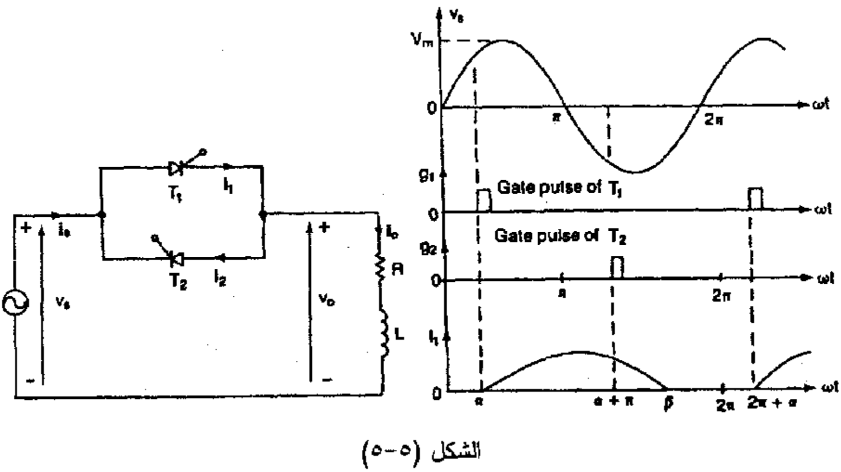
القيمة الفعالة للتيار في الثايروستور :-

$$I_{RT} = \frac{I_{rms}}{\sqrt{m}} = \frac{I_{rms}}{\sqrt{2}} = \frac{8.485}{\sqrt{2}} = 5.999 \approx 6A$$

٥-٣-٣- متحكمات الجهد أحادية الطور موجة كاملة بحمل حثي

Single-phase Ac Voltage Controllers with Inductive Load

يبين الشكل (٥-٥) الدائرة الكهربائية لمتحكم جهد أحادي الطور موجة كاملة بحمل حثي وشكل الموجة على الحمل.



الشكل (٥-٥)

دائرة متحكم جهد موجة كاملة بحمل حثي وشكل الموجة على الحمل

نتيجة وجود الحمل الحثي فإن تيار الثايروستور (T_1) يستمر في التوصيل إلى فترة زمنية تزيد عن $(\omega t = \pi)$. عندما يطبق الجزء السالب من الموجة ويستمر في التوصيل لفترة زمنية حتى يصل التيار المار من خلاله إلى الصفر عند زمن $(\omega t = \beta)$.

وتكون فترة التوصيل للثايروستور (T_1) مساوية إلى $(\delta = \beta - \alpha)$ والتي تعتمد على زاوية القدح (α) وزاوية فرق الطور للحمل (θ).

إذا كانت موجة الدخل:-

$$V_S = V_m Sin\,\omega t \tag{5.7}$$

فان حساب التيار يتم من العلاقة:-

$$V_S = L\frac{di}{dt} + R\,i$$

$$i = \frac{V_m}{Z}\,Sin(\omega t - \theta) + A\,e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

والثابت (A) يمكن احتسابه من الشروط الابتدائية:-

عندما $(\omega t = \alpha)$ يكون $(i = 0)$ فإن (A) تساوي:-

$$A = \frac{V_m}{Z}\,Sin(\alpha - \theta)\,e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega}\right)} \tag{5.8}$$

بالتعويض يكون :-

$$i = \frac{V_m}{Z}\left[Sin(\omega t - \theta) - Sin(\alpha - \theta)\, e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega - t}\right)} \right]$$

$$Sin(\beta - \theta) = Sin(\alpha - \theta)\, e^{\frac{\left(\frac{R}{L}\right)(\alpha - \beta)}{\omega}} \qquad (5.9)$$

حيث أن (β) هي زاوية الإطفاء أو زاوية الإخماد (Extinction Angle) .

علاقة زاوية القدح (α) مع زاوية فرق الطور (θ) :-

١- إذا كانت $(\alpha = \theta)$ فإن:-

$$Sin(\beta - \theta) = Sin(\beta - \alpha) = 0 \Rightarrow \beta - \alpha = \gamma = \pi$$

٢- بما أن زاوية التوصيل (γ) لا يمكن أن تكون اكبر من (π) فان زاوية القدح (α) لا يمكن أن تكون أصغر من (θ) وبالتالي فإن:-

$$\theta \le \alpha \le \pi$$

٣- إذا اعتبرنا أن $(\alpha \le \theta)$ فان تيار الحمل في هذه الحالة لن يتغير مع زاوية القدح (α) وسوف يقوم كلا الثايروستورين بالتوصيل فالثايروستور (T_1) سوف يوصل في الفترة $(\omega t = \theta)$. والثايروستور (T_2) سوف يوصل خلال الفترة $(\omega t = \pi + \theta)$.

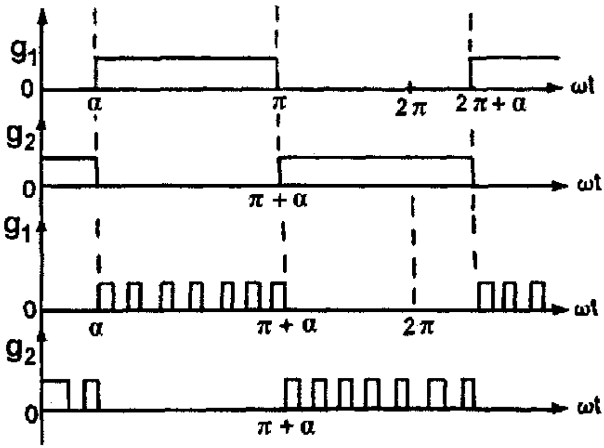
القيمة الفعالة لجهد الخرج تساوي :-

$$V_R = \sqrt{\frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\beta} V_m^2 Sin^2 \omega t \, d\omega t}$$

$$= \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\beta - \alpha + \frac{Sin 2\alpha}{2} - \frac{Sin 2\beta}{2}\right)} \qquad (5.10)$$

في متحكمات أحادية الطور موجة كاملة، عندما يكون حمل المتحكم حملا ماديا فإنه يمكن استخدام طريقة النبضات في قدح الثايروستورات. ولكن عندما يكون حمل المتحكم حملا حثيا فإن استخدام طريقة النبضات في قدح الثايروستورات لا يكون فعالا وذلك لأنة عندما يتم قدح الثايروستور (T_2) بزاوية قدح $(\pi+\alpha)$ فان الثايروستور الأول (T_1) يكون مازال في حالة التوصيل نتيجة وجود الحمل الحثي. وعند الفترة التي يفترض فيها قدح الثايروستور (T_2) ليقوم في عملية التوصيل فان هذا الثايروستور لا يوصل وبالتالي يبقى الثايروستور (T_1) في حالة التوصيل ممررا موجة تشبه موجة الدخل للجهد والتيار.

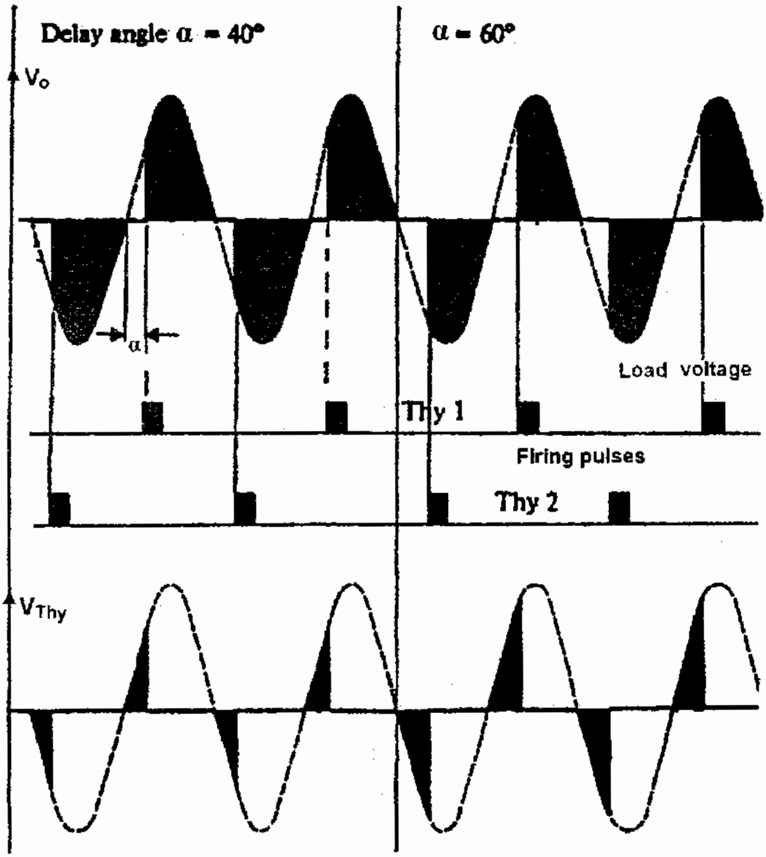
ويمكن التخلص من هذه الحالة باستخدام نبضة قدح مستمرة خلال الفترة $(\pi-\alpha)$. وعندما يصل التيار من خلال الثايروستور (T_1) إلى الصفر وبوجود نبضة قدح مستمرة على بوابة الثايروستور خلال الفترة التالية فان الثايروستور (T_2) سوف يقوم بعملية التوصيل .كما هو موضح في الشكل (٥-٦).



الشكل (٥-٦)

نبضة قدح مستمرة على بوابة الثايروستور

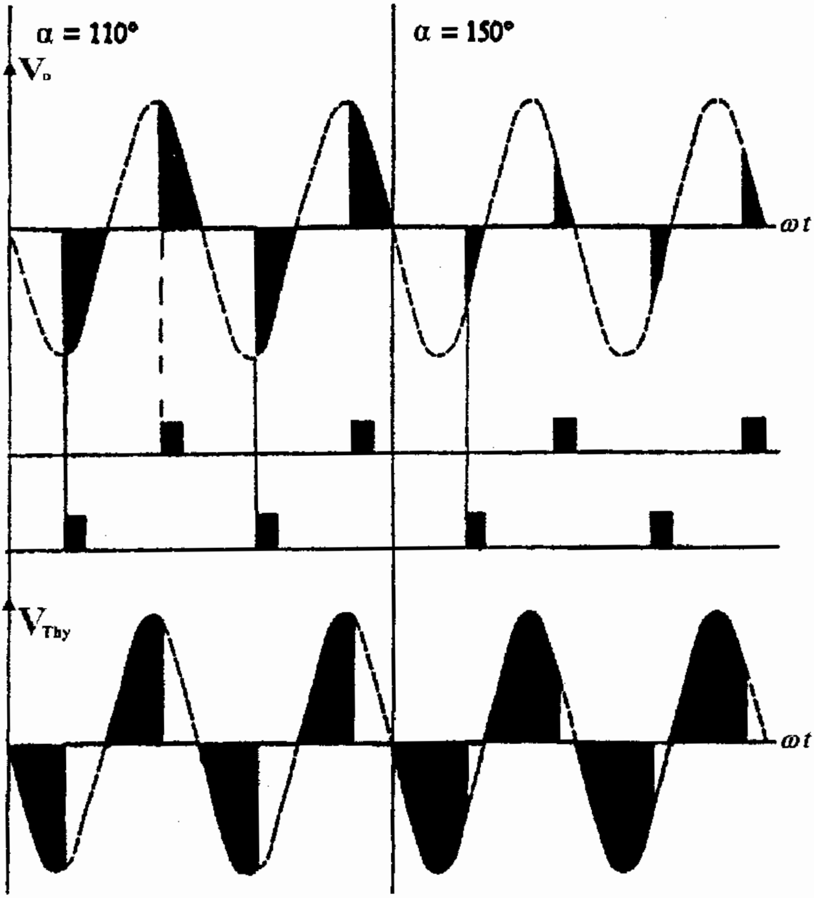
والشكل (٥-٧) يبين شكل الموجة على أطراف الحمل والثايرستور من اجل زوايا قدح مختلفة في حال كون الحمل حملا ماديا. في الشكل (٥-٧-a) يكون شكل الموجة الخارج والموجة المتبقية على الثايرستور من أجل زاوية قدح $(\alpha = 40^{\circ}, 60^{\circ})$.



الشكل (٥-٧-a)

شكل الموجة على أطراف الحمل والثايرستور في حالة الحمل المادي عند $(\alpha = 40^{\circ} , 60^{\circ})$

أما في الشكل (ه-٧-b) فيكون شكل الموجة الخارج والموجة المتبقية على الثايرستور من أجل زاوية قدح $(\alpha = 110^\circ, 150^\circ)$.

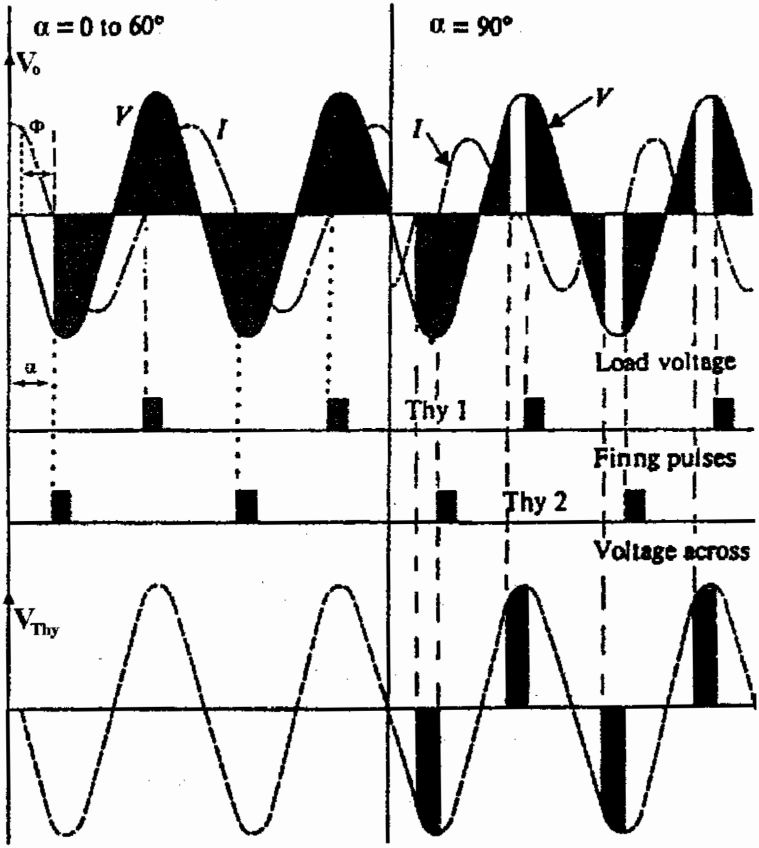


الشكل (ه-٧-b)

شكل الموجة على أطراف الحمل والثايرستور في حالة الحمل المادي

عند $(\alpha = 110^\circ \ , \ 150^\circ)$

والشكل(٥-٨) يبين شكل الموجة على أطراف الحمل والثايرستورات من اجل زوايا قدح مختلفة في حال كون الحمل حملا حثيا. في الشكل (٥-٨-a) يكون شكل الموجة الخارج والموجة المتبقية على الثايرستور من أجل زاوية قدح $(\alpha = 0^o \Rightarrow 60^o, 90^o)$.

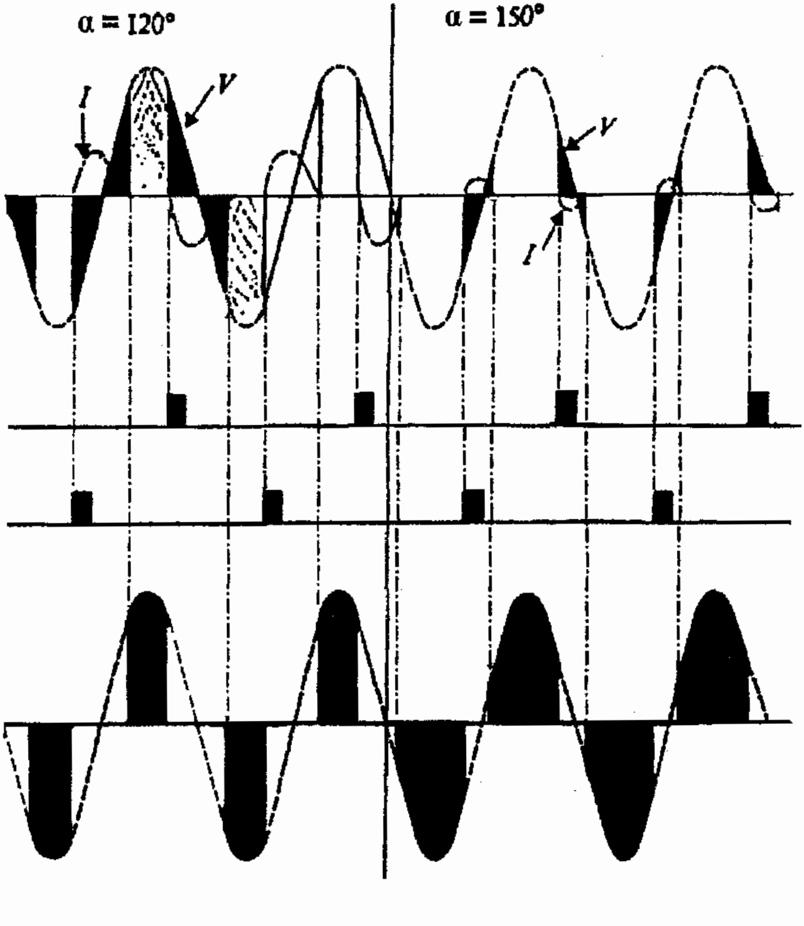


الشكل(٥-٨-a)

شكل الموجة على أطراف الحمل والثايرستورات في حالة الحمل حثي

عند زوايا قدح$(\alpha = 60^o \ , \ 90^o)$

أما في الشكل (٥-٨-b) فيكون شكل الموجة الخارج والموجة المتبقية على الثايرستور من أجل زاوية قدح $(\alpha = 120^o ,150^o)$.



الشكل(٥-٨-b)

شكل الموجة على أطراف الحمل والثايرستورات في حالة الحمل حثي

عند زوايا قدح$(\alpha = 120^o , 150^o)$

مثال (٥-٤):- متحكم جهد (Ac) أحادى الطور موجة كاملة بحمل حثي $(RL \quad Load)$ وجهد المدخل له يساوي $(V_S = 120V)$ بتردد $(f = 60Hz)$، والحمل يتألف من $(L = 6.5mH, R = 2.5\Omega)$. وإذا كانت زاوية القدح لكلا الثايروستورين $\left(\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\pi}{2}\right)$، وكانت زاوية (الإخماد) الإطفاء للثايروستور تساوي $(\beta = 220^\circ)$.

المطلوب حساب:-

١- زاوية التوصيل للثايروستور (T_1).

٢- القيمة الفعالة لجهد الخرج.

٣- القيمة الفعالة لتيار الخرج.

٤- القيمة المتوسطة للتيار والجهد.

الحل :-

١- $\gamma = \beta - \alpha = 220 - 90 = 130^\circ$

٢-

$$\gamma = \beta - \alpha = 220 - 90 = 130^\circ$$

$$V_m = \sqrt{2}V_S = \sqrt{2} \times 120 = 169.7V$$

$$V_R = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left[\beta - \alpha + \frac{Sin2\alpha}{2} - \frac{Sin2\beta}{2}\right]}$$

$$= 120\sqrt{\frac{1}{\pi}\left[\frac{220 \times \pi}{180} - \frac{\pi}{2} + \frac{Sin180}{2} - \frac{Sin440}{2}\right]}$$

$$= 68V$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega L^2}$$

$$= \sqrt{2.5^2 + \left(2\pi * 60 * 6.5 \times 10^{-3}\right)^2}$$

$$= 3.5\Omega$$

٣- $$I_R = \frac{V_R}{Z} = \frac{68}{3.5} = 19.4\ A$$

٤-

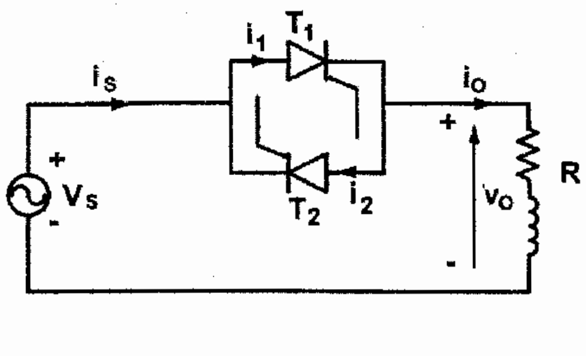
$$V_o = \frac{V_m}{\pi}\left[Cos\alpha + 1\right] = \frac{V_m}{\pi} = \frac{169.7}{\pi} = 54\ \ V$$

$$I_o = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{54}{2.5} = 21.6\ A$$

٥-٣-٤- تأثير مصدر التغذية والحمل الحثي على متحكمات الجهد المتناوب:-

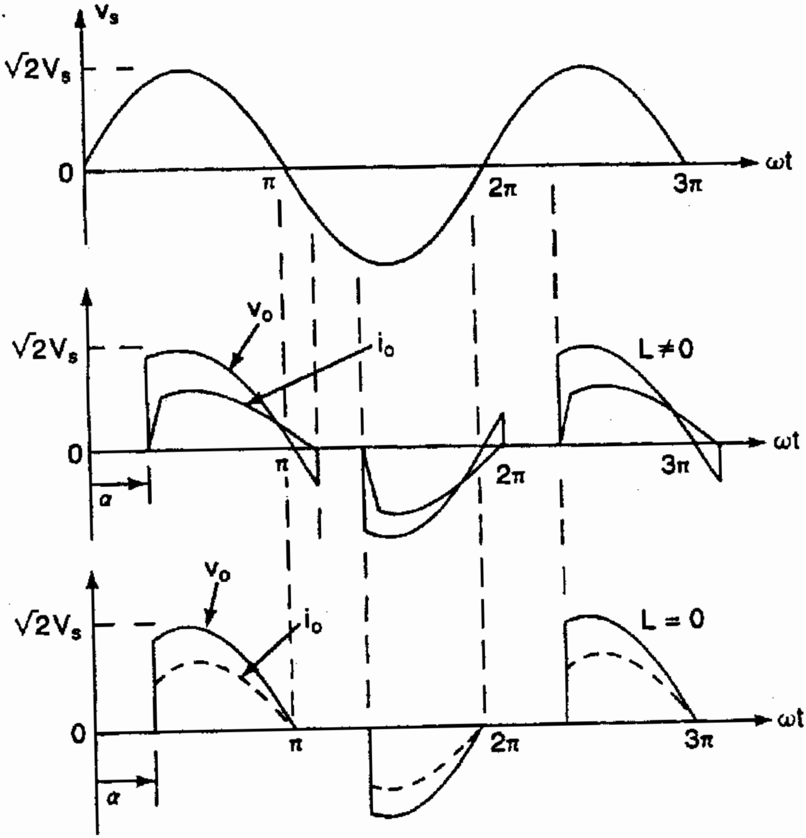
Effects of source and load Inductances

إذا كان المصدر يحتوي على عناصر حثية فإن ذلك يؤدي إلى تأخير في فصل الثايروستور، وبالتالي فأن الثايرستور لا يطفئ عند هبوط الجهد الى الصفر في مصدر الجهد. واستخدام نبضة بزمن قصير قد لا يؤدي الى إطفاء الثايرستور، مما يؤدي الى زيادة التشويش الناتج عن التوافقيات في دوائر الخرج. الحمل الحثي يؤدي إلى استمرار مرور التيار في الحمل. ومعامل الدخل يعتمد على معامل القدرة لدائرة الخرج. والشكل (٥-٩) يبين شكل موجة الخرج عند استخدام الحمل الحثي.



الشكل (٥-٩-b)

الدائرة الكهربائية لحمل حثي مادي

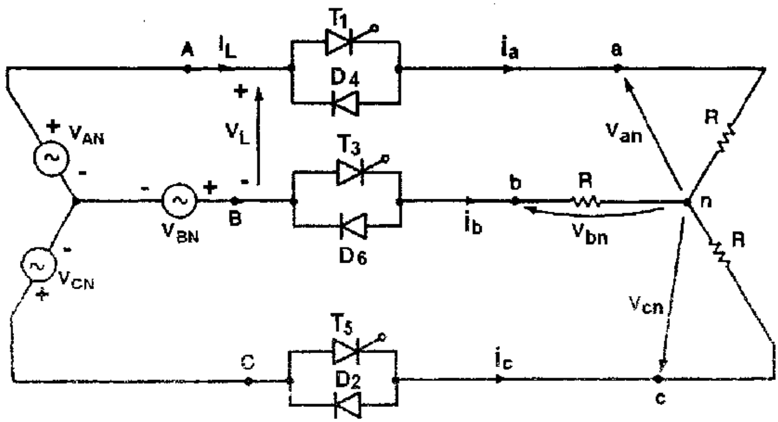


الشكل (٥-٩-a)

شكل موجة الخرج عندما يكون الحمل حثي ومادي

٥-٤- متحكمات الجهد ثلاثية الأطوار:-
Three-Phase Ac Voltage Controllers

٥-٤-١- متحكمات الجهد ثلاثية الأطوار نصف موجة (أحادية الاتجاه):-
Three-Phase Half-Wave Controllers



الشكل (٥-١٠)

يبين دائرة متحكم جهد ثلاثي الطور نصف موجة

الشكل (٥-١٠) يبين دائرة متحكم جهد ثلاثي الطور نصف موجة. التيار المار من خلال الحمل يمكن التحكم بــه عــن طريــق الــتحكم بالثايروســترات (T_1,T_3,T_5)، وتقوم الديودات بتأمين الممر الراجع للتيار. ويكون تــزامن القــدح للثايروستورات حسب الترتيب (T_5,T_3,T_1).

وحتى يمر التيار من خلال الحمل يجب أن يكــون أحــد الثايروســترات السابقة على الأقل في حالة أنحياز أمامي ومطبق علية إشارة القدح.

إذا كانت جميع العناصر السابقة عبارة عن ديودات فان ثلاثة ديودات سوف توصل في نفس الوقت وفترة التوصيل لكل ديود سوف تكون عبارة عن (180°).

ومرة أخرى فإن الثايروستور سوف يقوم بالتوصيل إذا كان جهد المصعد له اكبر من جهد المهبط وبشرط أن يكون هنالك نبضة قدح لهذا الثايروستور.

إذا كانت القيمة الفعالة لجهد الطور للمصدر هو (V_S)، فتكون القيم اللحظية للأطوار الثلاثة بالشكل التالي:-

$$V_m = \sqrt{2}V_S$$

$$v_{AN} = V_m Sin\, \omega t$$

$$v_{BN} = V_m Sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_{CN} = V_m = Sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

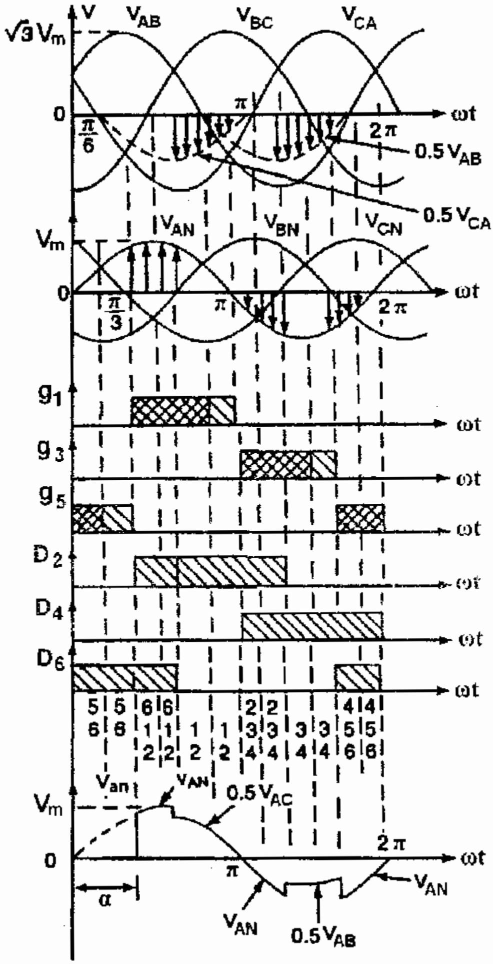
وتكون جهود الخطوط للمصدر تساوي إلى:-

$$v_{AB} = \sqrt{3}V_m Sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$v_{BC} = \sqrt{3}V_m Sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$v_{CA} = \sqrt{3}V_m Sin\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right)$$

وفترات التوصيل للثايروسترات وشكل الموجة على الحمل تعتمد على زاوية القدح (α) للثايروستورات. والشكل (٥-١١) يبين شكل موجة الدخل وفترة التوصيل لكل عنصر وشكل الموجة على الحمل من اجل زوايا قدح $(\alpha = 60^\circ)$.

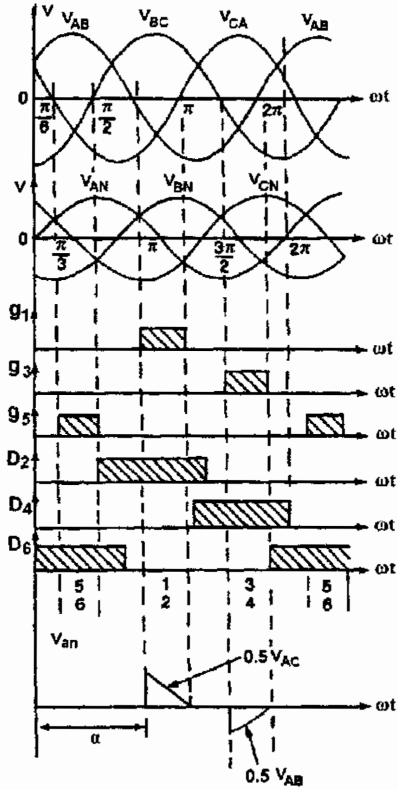


(a) For α = 60

الشكل (٥-١١)

شكل موجة الدخل والخرج وفترة التوصيل لكل عنصر عند $(\alpha = 60^\circ)$

ويبين الشكل (٥-١٢) شكل موجة الدخل وفترة التوصيل لكل عنصر وشكل الموجة على الحمل من اجل زوايا قدح $(\alpha = 150^\circ)$.



(b) For α = 150°

الشكل (٥-١٢)

شكل موجة الدخل والخرج وفترة التوصيل لكل عنصر عند $(\alpha = 150^\circ)$

من أجل $(0 \le \alpha \le 60^\circ)$، يكون هنالك عنصران أو ثلاثة في حالة توصيل، واحتمالات توصيل العناصر هي:-

١- ثايروستورين وديود واحد.

٢- ثايروستور واحد وديود واحد.

٣- ثايروستور واحد وديودين.

عندما تكون زاوية القدح $(\alpha = 60^\circ)$ فإن:-

(T_1) يوصل في الفترة $\left(\frac{\pi}{3} = 60^\circ \to \pi = 180^\circ\right)$.

(T_3) يوصل في الفترة $(180^\circ \to 300^\circ)$.

(T_5) يوصل في الفترة $(300^\circ \to 420(60^\circ))$.

(D_2) يوصل في الفترة $(60^\circ \to 240^\circ)$.

(D_4) يوصل في الفترة $(180^\circ \to 360^\circ)$.

(D_6) يوصل في الفترة $(300^\circ \to 480(120^\circ))$.

إذا كانت العناصر الثلاثة موصلة كما في الشكل (٥-١٣-a)، ففي هذه الحالة يظهر جهد فاز على الحمل مطابق لجهد الطور للمدخل كمثال:-

$$v_{an} = v_{AN} = V_m Sin\omega t \qquad (5.10)$$

إذا كان هنالك عنصرين موصلين في نفس الوقت، في هذه الحالة يمر التيار فقط في خطين وتيار الخط الثالث يمكن اعتباره وكأنة دائرة مفتوحة. وبالتالي يظهر جهد الخط للطورين الموصلين على طرفي الحمل كما يظهر في الشكل (٥-١٣-b) ويكون جهد الطور في هذه الحالة يمثل نصف جهد الخط لأن الطرف (C) يكون دائرة مفتوحة وبالتالي يظهر على الحمل جهد يساوي نصف جهد الخط كمثال:-

$$v_{an} = \frac{v_{AB}}{2} = \frac{\sqrt{3}V_m}{2} Sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \qquad (5.11)$$

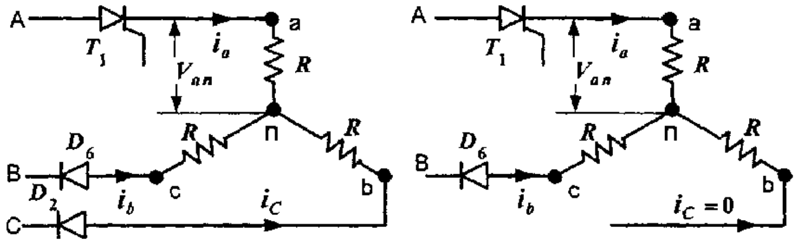
إذا كان جهد الطور يساوي صفراً تكون قيمة الجهد على الحمل تساوي صفراً.

من اجل $(60 \le \alpha \le 120^\circ)$:-

في هذه الحالة يقوم ثايروستور واحد بالتوصيل ويمكن أن يشارك في عملية التوصيل ديود واحد أو ديودين .

من اجل $\left(120 \le \alpha \le 180^{\circ}\right)$:-

في هذه الحالة يوصل ثايروستور واحد مع ديود واحد في نفس الوقت. ويبين الشكل (٥-١٣-b) طريقة التوصيل للعناصر عندما يكون الحمل موصولا بشكل نجمي.

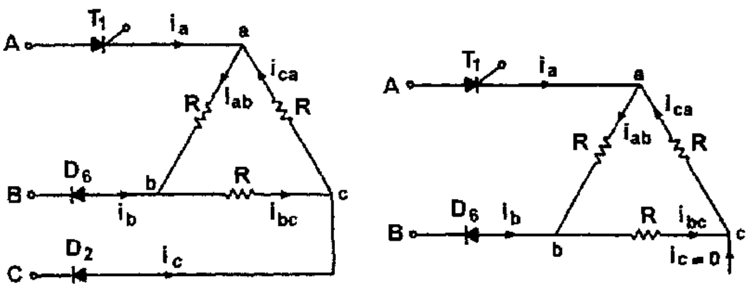


(b) ثايروستور وديود　　　　(a) ثايروستور وديودان .

الشكل (٥-١٣)

طريقة التوصيل للعناصر عندما يكون الحمل موصولا بشكل نجمي

والقيمة الفعالة للجهد على المخرج تعتمد على قيمة زاوية القدح للثايروسـتورات. والشكل (٥-١٤) و (٥-١٥) يبين عناصر التوصيل إذا كان الحمل موصولا بشكل مثلثي.



الشكل (٥-١٤)

عناصر التوصيل إذا كان الحمل موصولا بشكل مثلثي

ومما سبق فإنه يمكن إيجاد القيمة الفعالة لجهد الخرج على الحمل، والتي تعتمد اساساً على قيمة زاوية القدح كما يلي:-

من أجل $(0 \le \alpha < 90)$:-

$$V_R = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} v_{an}^2\, d(\omega t)}$$

$$V_R = \sqrt{6}V_S\left\{\frac{1}{\pi}\left[\int_{\alpha}^{2\pi/3}\frac{\sin^2\omega t}{3}d(\omega t) + \int_{\pi/2}^{\pi/2+\alpha}\frac{\sin^2\omega t}{4}d(\omega t)\right.\right.$$

$$+\int_{2\pi/3+\alpha}^{4\pi/3}\frac{\sin^2\omega t}{3}d(\omega t) + \int_{3\pi/2}^{3\pi/2+\alpha}\frac{\sin^2\omega t}{4}d(\omega t)$$

$$\left.\left.+\int_{4\pi/3+\alpha}^{2\pi}\frac{\sin^2\omega t}{3}d(\omega t)\right]\right\}^{1/2}$$

$$V_R = \sqrt{3}V_S\left[\frac{1}{\pi}\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8}\right)\right]^{1/2} \qquad (5.12)$$

من أجل $(90 \le \alpha < 120)$:-

$$V_R = \sqrt{6}V_S\left\{\frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{2\pi/3}\frac{\sin^2\omega t}{3}d(\omega t) + \int_{\pi/2}^{\pi}\frac{\sin^2\omega t}{4}d(\omega t)\right.\right.$$

$$+\int_{2\pi/3+\alpha}^{4\pi/3}\frac{\sin^2\omega t}{3}d(\omega t) + \int_{3\pi/2}^{2\pi}\frac{\sin^2\omega t}{4}d(\omega t)$$

$$\left.\left.+\int_{4\pi/3+\alpha}^{2\pi}\frac{\sin^2\omega t}{3}d(\omega t)\right]\right\}^{1/2}$$

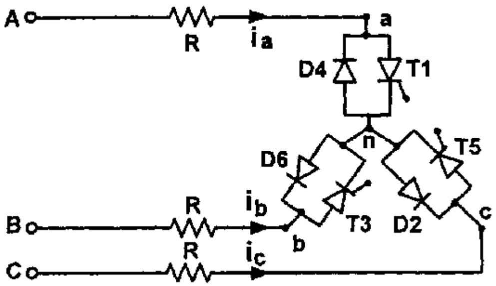
$$V_R = \sqrt{3}V_S\left[\frac{1}{\pi}\left(\frac{11\pi}{24} - \frac{\alpha}{2}\right)\right]^{1/2} \qquad (5.13)$$

من أجل $(120 \le \alpha < 210^{o})$:-

$$V_R = \sqrt{6}\,V_S\left\{\frac{1}{2\pi}\left[\int_{\pi/2-2\pi/3+\alpha}^{\pi}\frac{\sin^2 \omega t}{4}d(\omega t)+\int_{3\pi/2-2\pi/3+\alpha}^{2\pi}\frac{\sin^2 \omega t}{4}d(\omega t)\ \right]\right\}^{1/2}$$

$$V_R = \sqrt{3}V_S\left[\frac{1}{\pi}\left(\frac{7\pi}{24}-\frac{\alpha}{4}+\frac{\sin 2\alpha}{16}-\frac{\sqrt{3}\cos 2\alpha}{16}\right)\right]^{1/2} \qquad (5.14)$$

وأنواع هذه المتحكمات للجهد تعتمد على طريقة توصيل الحمل وطريقة توصيل عناصر التحكم.



الشكل (٥-١٥)

ترتيبه بديلة لحاكمات الجهد ثلاثية الطور أحادية الاتجاه

مثال (٥-٥):- مقوم محكوم ثلاثي الطور نصف موجة (أحادي الاتجـاه) بحمـل مادي $(R = 10\Omega)$، وجهد الخط للمصدر يساوي $(V_{L\text{-}L} = 280V, f = 60Hz)$. زاوية القدح $(\alpha = \pi/3)$. أوجد القيمة الفعالة للفولتية الخارجة (V_R). معامل القدرة للدخل. وأكتب تعابير الفولطية الخارجة للطور (a).

الحل:-

$$V_L = 208V\ ,\ V_S = V_L/\sqrt{3} = 208/\sqrt{3} = 120V \quad ,\ \alpha = \pi/3 \quad and \quad R = 10\Omega$$

نجد قيمة (V_R) .عند $\left(\alpha = \pi/3\right)$.

$$V_R = \sqrt{3}V_S\left[\frac{1}{\pi}\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\alpha}{4}+\frac{\sin 2\alpha}{8}\right)\right]^{1/2} = \sqrt{3}\times 120\left[\frac{1}{\pi}\left(\frac{\pi}{3}-\frac{\pi}{12}+\frac{\sin 2\pi}{24}\right)\right]^{1/2}$$

$$V_R = 110.8\ V$$

والقيمة الفعالة لتيار الحمل تساوي:-

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{110.86}{10} = 11.086\ A$$

القدرة الفعالة الخارجة على الحمل تساوي:-

$$P = 3I_R^2\,R = 3\times 11..086^2\times 10 = 3686.98\ W$$

وحيث أن الحمل موصول بشكل نجمة فإن $\left(I_L = I_R = 11.086\,A\right)$. وبالتالي فإن معدل القدرة الداخلة بالفولط أمبير تساوي:-

$$P_{VA} = 3V_S I_L = 3\times 120\times 11..08^2 = 3990.96\ VA$$

معامل القدرة يساوي:-

$$PF\,\frac{P_o}{P_{VA}} = \frac{3686.98}{3990.96} = 0.924\ \ (Lagging)$$

إذا أخذ جهد الطور (a) كجهد مرجعي فإن:-

$$v_{AN} = 169.7\ \sin\omega t$$

وبالتالي فإن جهود الخطوط تساوي:-

$$v_{AB} = 208\times\sqrt{2}Sin\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right) = 294.2\ \ Sin\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)$$

$$v_{BC} = 294.2\ \ Sin\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)$$

$$v_{CA} = 294.2\ \ Sin\left(\omega t-\frac{7\pi}{6}\right)$$

وبالاعتماد على الشكل (٥-١١) يمكن كتابة قيم فولتية الطور (v_{an}) كما يلي:-

$$FOR\ \ 0 \le \omega t < \pi/3: \qquad v_{an} = 0$$

$$FOR\ \ \pi/3 \le \omega t < 4\pi/6: \qquad v_{an} = v_{AN} = 169.7\sin\omega t$$

$$FOR\ \ 4\pi/6 \le \omega t < \pi: \quad v_{an} = -\frac{v_{AC}}{2} = -\frac{294.2}{2} = +147.1Sin\left(\omega t - \frac{7\pi}{6} - \pi\right)$$

$$FOR\ \ \pi \le \omega t < 4\pi/2: \qquad v_{an} = v_{AN} = 169.7\sin\omega t$$

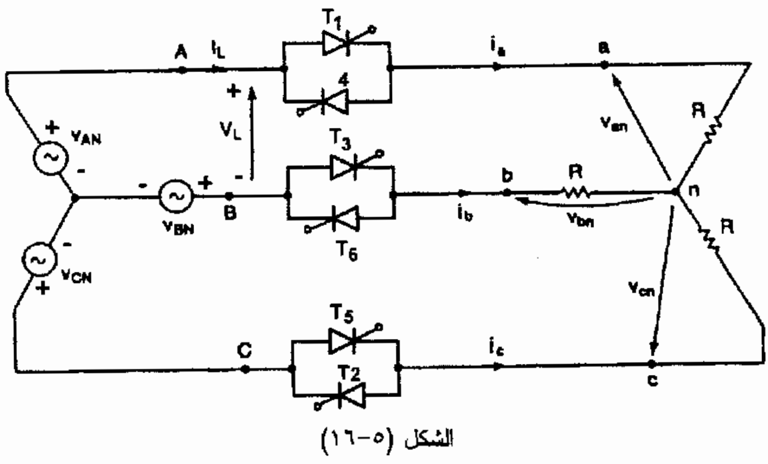
$$FOR\ \ 4\pi/2 \le \omega t < 5\pi/3: \qquad v_{an} = \frac{v_{AB}}{2} = \frac{294.2}{2} = 147.1\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$FOR\ \ 5\pi/3 \le \omega t < 2\pi: \qquad v_{an} = v_{AN} = 169.7\sin\omega t$$

٥-٤-٢- متحكمات الجهد ثلاثية الأطوار موجة كاملة (ثنائية الاتجاه):-

Three-Phase Full-Wave Ac Voltage Controller

يمكن وصل هذه المتحكمات بطرق مختلفة (نجمي أو مثلثي)، يبين الشكل (٥-١٦) دائرة حاكمات الجهد بشكل نجمي.



الشكل (٥-١٦)

دائرة متحكمات جهد ثلاثية الأطوار موجة كاملة توصيل نجمي

وجهود الأطوار تعطى بالعلاقات:-

$$v_{AN} = V_m Sin\omega t$$

$$v_{BN} = V_m Sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_{CN} = V_m Sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

وجهود الخطوط تعطى بالعلاقة:-

$$v_{AB} = \sqrt{3}V_m Sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$v_{BC} = \sqrt{3}V_m Sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$v_{CA} = \sqrt{3}V_m Sin\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right)$$

يكون تزامن القدح للثايروستورات بالترتيب التالي:-

$$T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$$

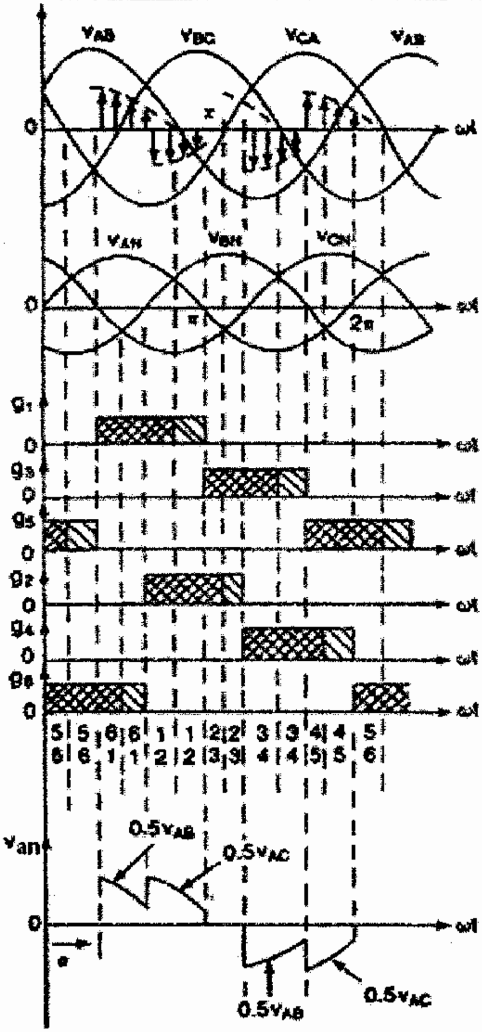
لزوايا القدح $\left(0 \le \alpha \le 60^\circ\right)$، وقبل قدح الثايروستور $\left(T_1\right)$ يكون هنالك ثايروستوران في حالة التوصيل.

وعندما يتم قدح الثايرستور $\left(T_1\right)$ يكون هنالك ثلاثة ثايرستورات في حالة التوصيل. وبالتالي فإن عناصر التوصيل تكون محصورة بثايرستورين أو ثلاثة ثايرستورات.

ولزوايا القدح $\left(60 \le \alpha < 90^\circ\right)$، فإنه في هذه الحالة يقوم ثايرستورين بالتوصيل في نفس الوقت.

ولزوايا القدح $\left(90 \le \alpha < 150^\circ\right)$، فإنه في هذه الحالة يقوم ثايرستورين بالتوصيل في نفس الوقت.

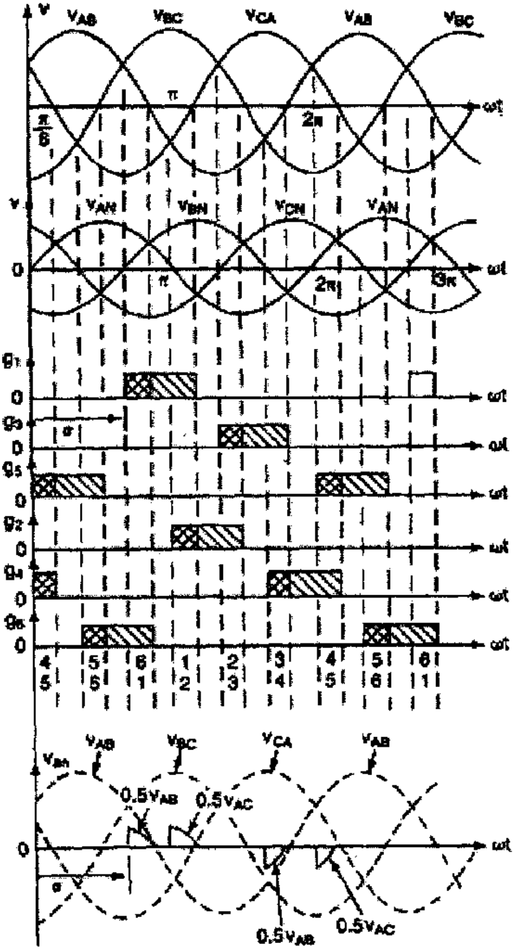
ولزوايا القدح $(\alpha \geq 150^{\circ})$، فإنه في هذه الحالة لا يوجد أي ثايرستور فـــي حالة التوصيل، ويكون الجهد على الحمل مساوياً للصفر عند $(\alpha = 150^{\circ})$.
مجال التحكم في زاوية القدح محصور ضمن المجـــال $(0 \leq \alpha \leq 150^{\circ})$. ويبـــين الشكل (٥-١٧) شكل الموجة على الحمل عند زاوية قدح $(\alpha = 60)$.



الشكل (٥-١٧)

شكل الموجة على الحمل عند زاوية قدح $(\alpha = 60)$ موجة كاملة ثنائية الاتجاه

ويبين الشكل (٥–١٨) شكل الموجة على الحمل عند زاوية قدح $(\alpha = 120)$.



الشكل (٥–١٨)

شكل الموجة على الحمل عند زاوية قدح $(\alpha = 120)$ موجة كاملة ثنائية الاتجاه

ومما سبق فإنه يمكن إيجاد القيمة الفعالة لجهد الخرج على الحمل، والتي تعتمد أساساً على قيمة زاوية القدح كما يلي:-

من أجل $(0 \le \alpha < 60)$:-

$$V_R = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} v_{an}^2 \, d(\omega t)}$$

$$V_R = \sqrt{6}\, V_S \left\{ \frac{1}{\pi}\left[\int_0^{\pi/3} \frac{\sin^2 \omega t}{3} d(\omega t) + \int_{\pi/4}^{\pi/2+\alpha} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) \right.\right.$$

$$+ \int_{\pi/3+\alpha}^{2\pi/3} \frac{\sin^2 \omega t}{3} d(\omega t) + \int_{\pi/2}^{\pi/2+\alpha} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t)$$

$$\left.\left. + \int_{2\pi/3+\alpha}^{\pi} \frac{\sin^2 \omega t}{3} d(\omega t) \ \right] \right\}^{1/2}$$

$$V_R = \sqrt{6} V_S \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right]^{1/2} \qquad (5.15)$$

من أجل $(60 \le \alpha < 90^o)$:-

$$V_R = \sqrt{6}\, V_S \left\{ \frac{2}{2\pi} \left[\int_{\pi/2-\pi/3+\alpha}^{5\pi/6-\pi/3+\alpha} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) + \int_{\pi/2-\pi/3+\alpha}^{5\pi/6-\pi/3+\alpha} \frac{\sin^2 \omega t}{4} d(\omega t) \right. \right\}^{1/2}$$

$$V_R = \sqrt{6} V_S \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{12} + \frac{3 \sin 2\alpha}{16} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} \right) \right]^{1/2} \qquad (5.16)$$

من أجل $\left(90 \le \alpha < 150^o\right)$:-

$$V_R = \sqrt{6}\,V_S\left\{\frac{2}{2\pi}\left[\int_{\pi/2-\pi/3+\alpha}^{\pi}\frac{\sin^2\omega t}{4}d(\omega t)+\int_{\pi/2-\pi/3+\alpha}^{\pi}\frac{\sin^2\omega t}{4}d(\omega t)\right]\right\}^{1/2}$$

$$V_R = \sqrt{6}V_S\left[\frac{1}{\pi}\left(\frac{5\pi}{24}-\frac{\alpha}{4}+\frac{\sin 2\alpha}{16}-\frac{\sqrt{3}\cos 2\alpha}{16}\right)\right]^{1/2} \qquad (5.17)$$

مثال (٥-٦):- مقوم محكوم ثلاثي الطور موجة كاملة (ثنائي الاتجـاه)، بحمـل مادي $(R = 10\Omega)$، وجهد الخط للمصدر يـساوي $(V_{L-L} = 280V,\ f = 60Hz)$. زاوية القدح $\left(\alpha = \pi/3\right)$. أوجد القيمة الفعالة للفولتية الخارجة (V_R). معامل قـدرة الدخل. وأكتب تعابير الفولتية الخارجة للطور (a).

الحل:-

$$V_L = 208V\ ,\ V_S = V_L/\sqrt{3} = 208/\sqrt{3} = 120V \quad ,\ \alpha = \pi/3 \quad and \quad R = 10\Omega$$

نجد قيمة (V_R) عند $\left(\alpha = \pi/3\right)$.

$$V_R = \sqrt{6}V_S\left[\frac{1}{\pi}\left(\frac{\pi}{6}-\frac{\alpha}{4}+\frac{\sin 2\alpha}{8}\right)\right]^{1/2} = \sqrt{3}\times 120\left[\frac{1}{\pi}\left(\frac{\pi}{6}-\frac{\pi}{12}+\frac{\sin 2\pi}{24}\right)\right]^{1/2}$$

$$V_R = 100.9\ V$$

والقيمة الفعالة لتيار الحمل تساوي:-

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{100.9}{10} = 10.09A$$

القدرة الفعالة الخارجة على الحمل تساوي:-

$$P = 3I_R^2\ R = 3\times 10..09^2 \times 10 = 3054.24\ W$$

وحيث أن الحمل موصول بشكل نجمة فإن $(I_L = I_R = 10.09A)$. وبالتالي فـإن معدل القدرة الداخلة بالفولط أمبير تساوي:-

$$P_{VA} = 3V_S I_L = 3\times 120\times 10..09 = 3632.4\ VA$$

معامل القدرة يساوي:-

$$PF = \frac{P}{P_{VA}} = \frac{3054.24}{3632.4} = 0.84 \ (Lagging)$$

إذا كانت فولتية الطور (a) هي القيمة المرجعية فإن:- $v_{AN} = 169.7 \sin \omega t$

وبالتالي فإن جهود الخطوط تساوي:-

$$v_{AB} = 208 \times \sqrt{2} Sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) = 294.2 \ Sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$v_{BC} = 294.2 \ Sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$v_{CA} = 294.2 \ Sin\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right)$$

وبالاعتماد على الشكل (٥-١٧) يمكن كتابة قيم فولتية الطور (v_{an}) كما يلي:-

$$FOR \ \ 0 \le \omega t < \pi/3 : \qquad v_{an} = 0$$

$$FOR \ \ \pi/3 \le \omega t < 2\pi/3 : \qquad v_{an} = v_{AB}/2 = 294.2/2 = 147.1 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$FOR \ \ 2\pi/3 \le \omega t < \pi : \qquad v_{an} = \frac{v_{AC}}{2} = -\frac{v_{CA}}{2} = 147.1 \sin\left(\omega t - \frac{7\pi}{6} - \pi\right)$$

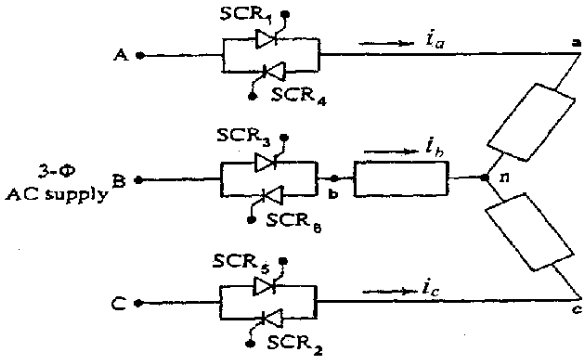
$$FOR \ \ \pi \le \omega t < 4\pi/3 : \qquad v_{an} = 0$$

$$FOR \ \ 4\pi/3 \le \omega t < 5\pi/3 : \qquad v_{an} = \frac{v_{AB}}{2} = \frac{294.2}{2} = 147.1 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$FOR \ \ 5\pi/3 \le \omega t < 2\pi : \qquad v_{an} = v_{AC}/2 = 147.1 \sin\left(\omega t - \frac{7\pi}{6} - \pi\right)$$

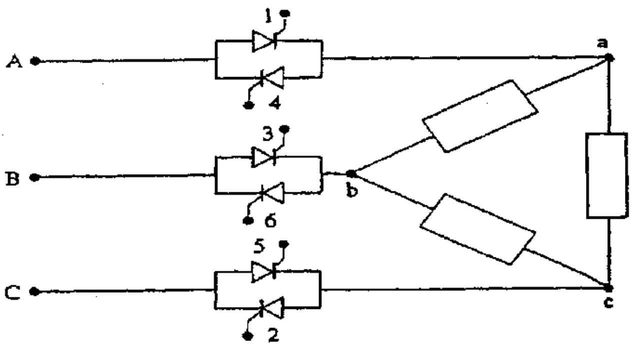
ومن الملاحظ أن معامل القدرة يعتمد على زاوية القدح (α).

يبين الشكل (٦-١٩) طرق توصيل متحكمات الجهد ثلاثية الأطوار موجة كاملة (ملثي ونجمة).



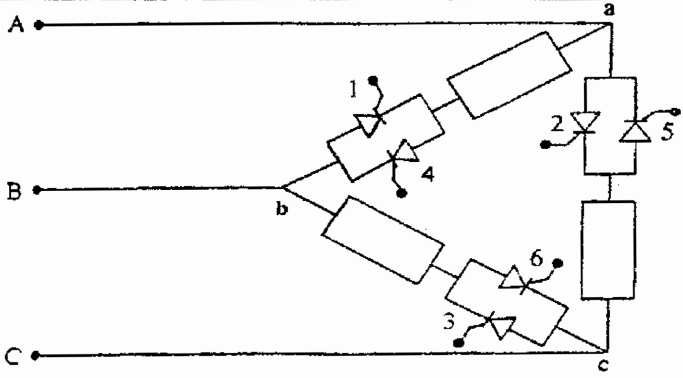
الشكل (٥-١٩-a)

الدائرة تعطي جهد منخفض على أطراف الحمل وتيار مرتفع خلال الثايرستور



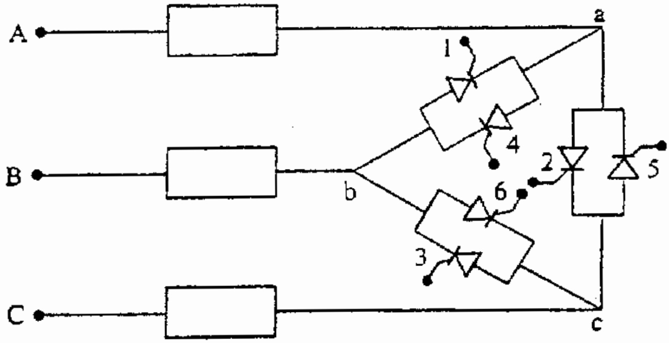
الشكل (٥-١٩-b)

الدائرة تعطي جهد منخفض على أطراف الحمل وتيار مرتفع خلال الثايرستور



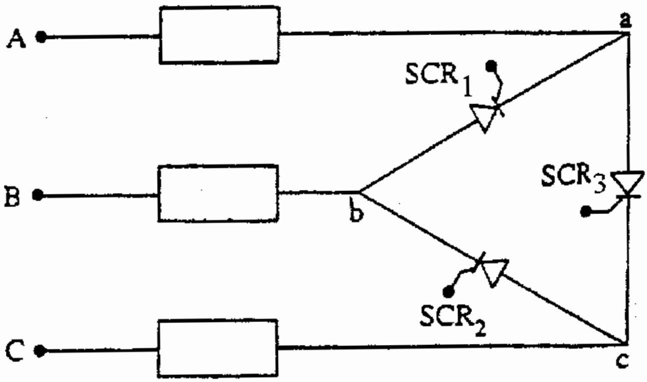
الشكل (٥-١٩-c)

الدائرة تعطي جهد مرتفع على أطراف الحمل وتيار منخفض خلال الثايرستور



الشكل (٥-١٩-d)

الدائرة تعطي جهد منخفض على أطراف الحمل وتيار مرتفع خلال الثايرستور

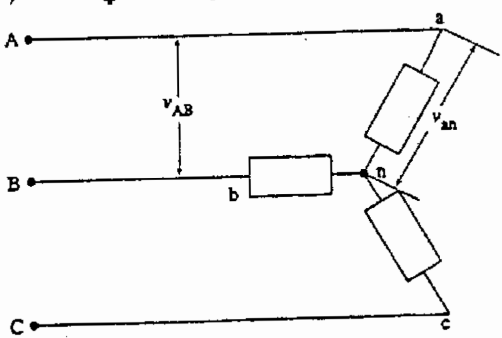


الشكل (٥-١٩-e)

التحكم بجهد الحمل باستخدام ثلاثة ثايرستورات بدلاً من ستة

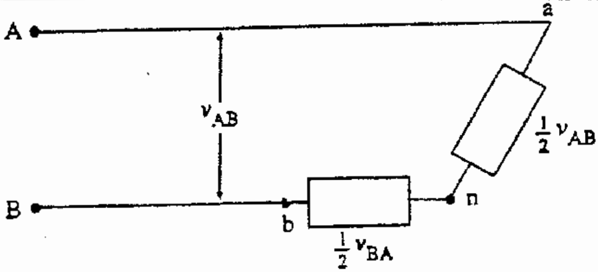
وفي الشكل (٥-١٩-e) فإن التيار المار من خلال الثايروستور يساوي ضعف التيار المار من خلال الثايروستور للدوائر السابقة من الشكل (٥-١٩).

ولتحليل عمل هذه المتحكمات حسب الدائرة المبينة في الشكل (٥-١٩-a). طبيعة عمل هذه الدائرة يعتمد على زاوية القدح (α) للثايروستورات، وحسب مقدار هذه الزاوية فإنه يوجد أربعة احتمالات لعمل الدائرة مبينة في الشكل (٥-٢٠).



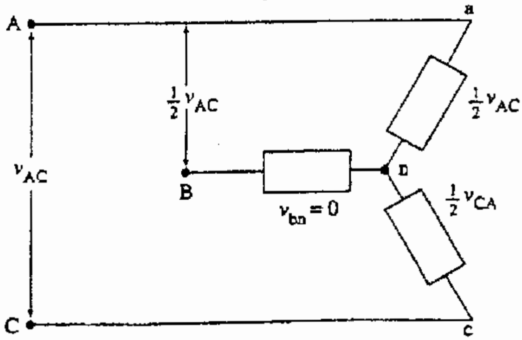
الشكل (٥-٢٠)

الاحتمال الاول من التوصيل



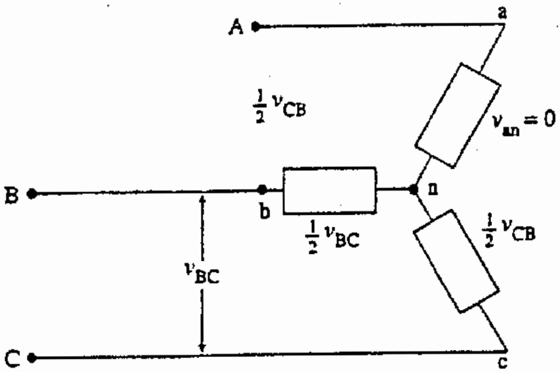
الشكل (٥-٢٠)

الاحتمال الثاني من التوصيل



الشكل (٥-٢٠)

الاحتمال الثالث من التوصيل



الشكل (٥-٢٠) الاحتمال الرابع من التوصيل

ملاحظة:- في حال كون احد الثايرستورات في حالة التوصيل في كل خط فإن الجهد على إطراف الحمل يساوي جهد الطور. في حال كون احد الثايرستورات في حالة الفصل في أحد الخطوط فإن الجهد على أطراف الحمل يساوي نصف جهد الخط، حيث تعمل الدائرة في هذه الحالة عمل دائرة أحادية الطور ويكون مصدر الجهد لها يساوي جهد الخط بين الطورين.

ويمكن تلخيص عمل الدائرة حسب قيم زاوية القدح للحمل المادي بالأوضاع الرئيسية التالية:-

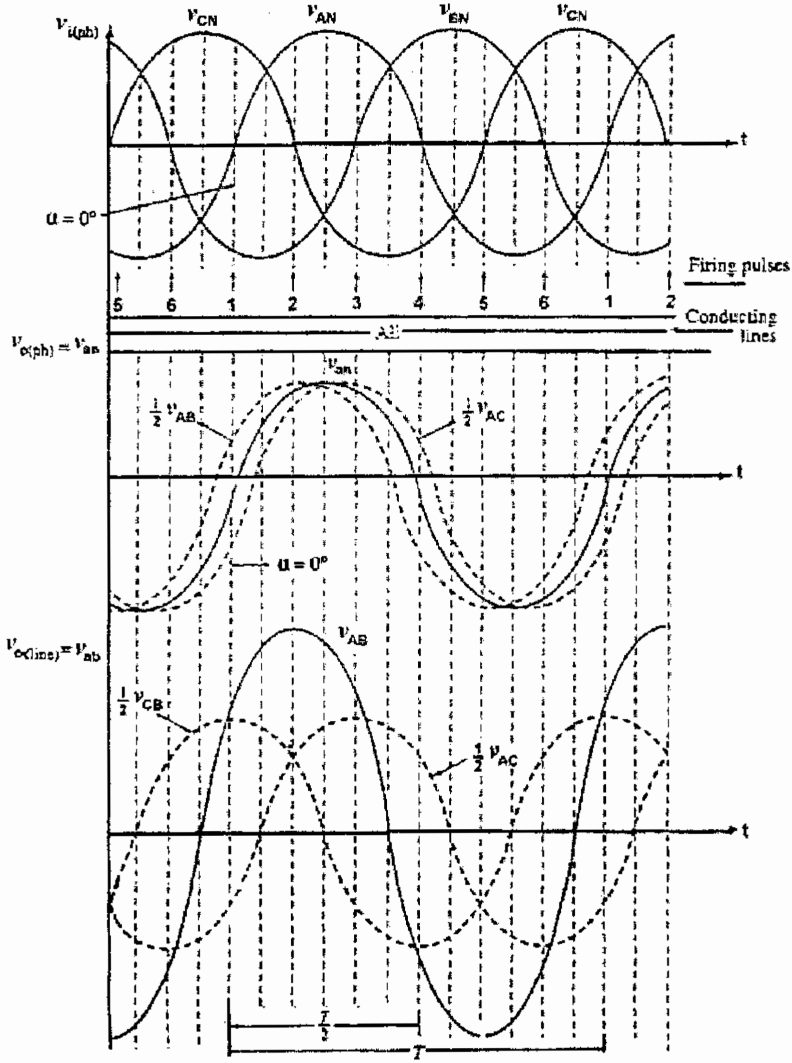
١- إذا كانت $\left(0 \le \alpha \le 60^{\circ}\right)$، وتزامن القدح يكون بالترتيب:-

$T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$

وفي هذه الحالة فان القيمة الفعالة للجهد على إطراف الحمل تعطى بالعلاقة:-

$$V_{rms} = V_S \sqrt{\frac{1}{3} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{Sin 2\alpha}{4\pi}} \qquad (5.18)$$

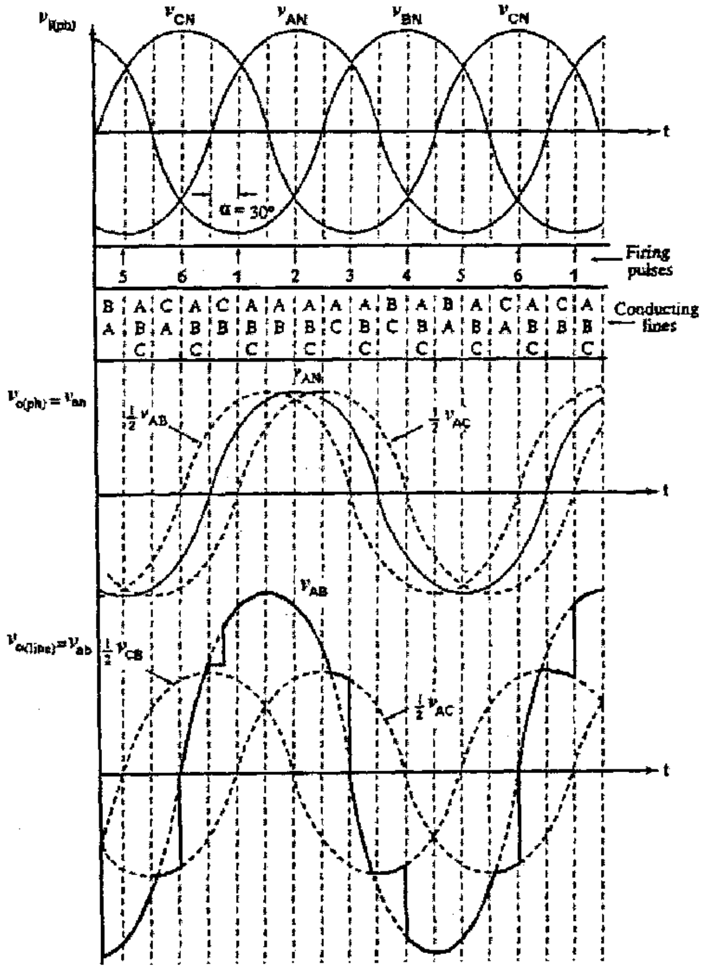
الشكل (٥-٢١) يبين شكل موجة الخرج من أجل زاوية قدح $(\alpha = 0^\circ)$:-



الشكل (٥-٢١)

شكل موجة الخرج من أجل زاوية قدح $(\alpha = 0^\circ)$

الشكل (٥-٢٢) يبين شكل موجة الخرج من اجل زاوية قدح $(\alpha = 30^{\circ})$:-



الشكل (٥-٢٢)

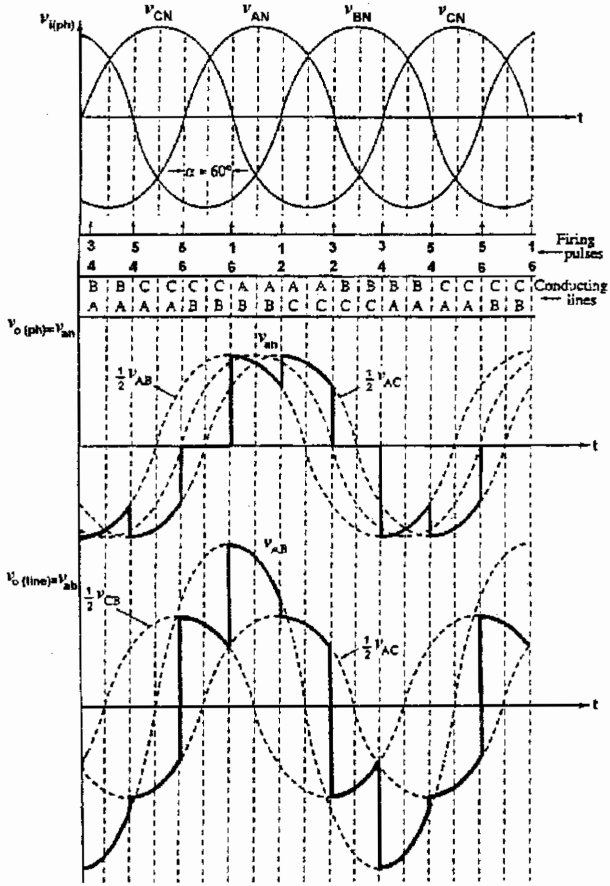
يبين شكل موجة الخرج من اجل زاوية قدح $(\alpha = 30^{\circ})$

٢- إذا كانت $(60 \le \alpha \le 90)$:- في هذه الحالة يوصل ثايروستور وحيد في خطين من الدائرة. ويكون جهد الطور على الحمل يساوي نصف جهــد الخــط , وفتــرة التوصيل لكل ثايروستور تساوي (120°).

والقيمة الفعالة للجهد على إطراف الحمل تعطى بالعلاقة:-

$$V_{rms} = V_S \sqrt{\frac{1}{6} - \frac{3\,Sin\,2\alpha}{8\pi} + \frac{\sqrt{3}\,Cos\,2\alpha}{8\pi}} \qquad (5.19)$$

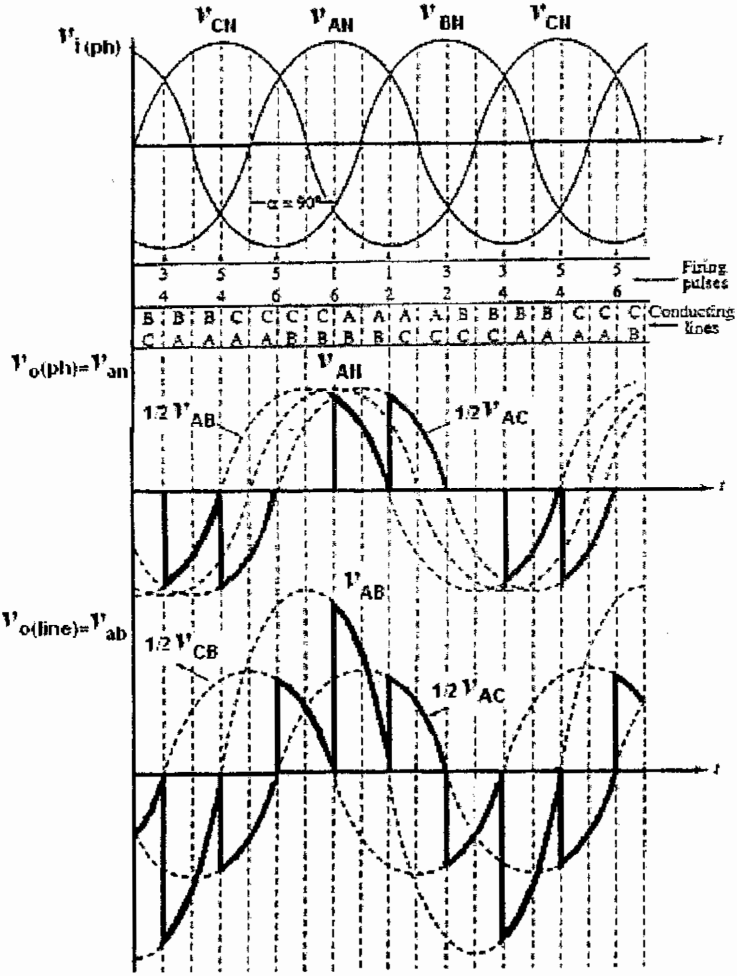
الشكل (٥-٢٣) يبين شكل موجة الخرج من اجل زاوية قدح $(\alpha = 60^\circ)$.



الشكل (٥-٢٣)

شكل موجة الخرج من اجل زاوية قدح $(\alpha = 60^\circ)$

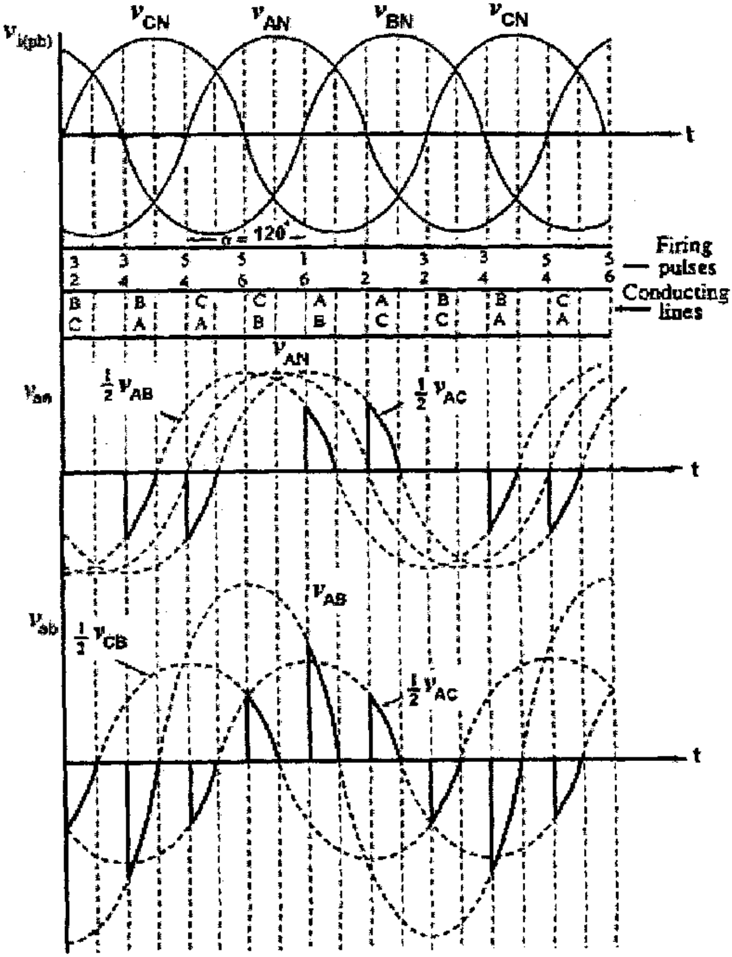
الشكل (٥-٢٤) يبين شكل موجة الخرج من اجل زاوية قدح $(\alpha = 90^{\circ})$.



الشكل (٥-٢٤)

شكل موجة الخرج من اجل زاوية قدح $(\alpha = 90^{\circ})$

يبين الشكل (٥-٢٥) شكل موجة الخرج من اجل زاوية قدح $(\alpha = 120^\circ)$.



الشكل (٥-٢٥)

شكل موجة الخرج من اجل زاوية قدح $(\alpha = 120^\circ)$

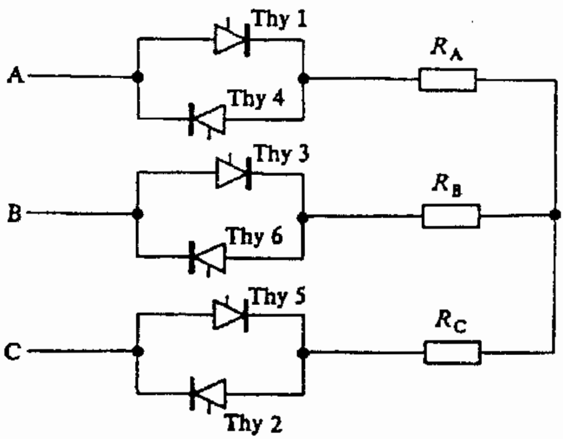
٣- إذا كانت $(90 \le \alpha \le 150)$:- في هذه الحالة لا يوجد أكثر من ثايروستور في خطين في حالة توصيل، وفترة التوصيل لكل ثايروستور تساوي (120°) . والقيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل تعطى بالعلاقة:-

$$V_{rms} = \sqrt{3}\, V_S \sqrt{\frac{5}{12} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{Sin\,2\alpha}{8\pi} + \frac{\sqrt{3}\,Cos\,2\alpha}{8\pi}} \qquad (5.20)$$

٤- إذا كانت $(\alpha \ge 150)$:- فإنه في هذه الحالة لا يوجد أي ثايروستور في حالة التوصيل ويكون الجهد على أطراف الحمل يساوي الصفر.

ولتحليل عمل متحكمات الجهد ثلاثية الأطوار نجميه التوصيل موجة كاملة. إذا كان الحمل مادي، إستخدم التحكم بزاوية الطور.

لنأخذ الدائرة المبينة في الشكل (٥-٢٦) من اجل هذا التحليل:-



الشكل (٥-٢٦)

دائرة متحكم جهد ثلاثية الأطوار توصيل نجمي

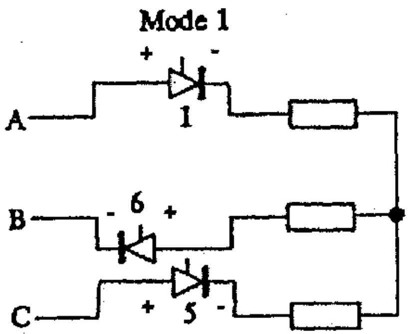
في هذه الدائرة يكون جهود الأطوار منسوبة إلى نقطة الحيادي هي (V_A, V_B, V_C) بزاوية فرق طور مقدارها (120°). وسوف يتم قدح الثايرويستورات

بالتتابع من الثايروستور (T_1) وحتى الثايروستور (T_6) كما هو مبين في الشكل (٥-٢٥) وهو التتابع للأطوار $(A-B-C)$.

لنفترض أن كل ثايروستور يمكن قدحه بزاوية تصل إلى (180°)، حيث يمكن أن يمر التيار خلال أي ثايروستور إذا كان هذا الثايروستور ذو انحياز أمامي (مطبق علية جهد انحياز أمامي).

ولهذه الدائرة ستة أوضاع من العمل لكل دورة من دورات موجة الدخل وفي كل وضع من هذه الأوضاع فان التيار يستطيع المرور في كل الأطوار الثلاثة، في اثنان منها يكون التيار في نفس الاتجاه وفي الطور الثالث يكون التيار بعكس الاتجاه طالما أن هذه الثايروستورات في حالة الانحياز الأمامي (جهد المصعد موجب بالنسبة إلى المهبط). وهذه الأوضاع من العمل تحدث في فترات مختلفة من الدورة معتمدة على زاوية القدح المستخدمة. وتتابع العمل لهذه الأوضاع سوف يتم شرحه للوصول إلى أشكال موجة الحمل المبينة في الشكل (٥-٣٣)، وذلك من اجل زاوية قدح $(\alpha = 30^\circ)$.

١- الوضع الأول:- تكون الدائرة في هذا الوضع مبينة في الشكل (٥-٢٧).

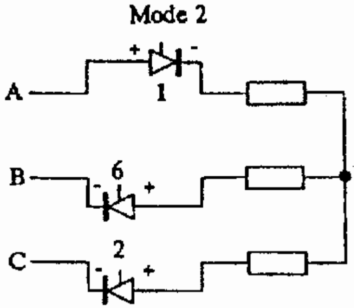


الشكل (٥-٢٧)

دائرة الوضع الأول

في هذا الوضع يكون الجهد لكلا الطور ين (A,C) (V_A,V_C) موجبا والجهد للطور (B) (V_B) سالبا. جميع الثايروستورات الثلاثة تكون موصلة وخط الحيادي للحمل يكون علية نفس الجهد لمصدر الجهد. تيار الطور وجهد الحمل سوف يتبعان جهد المصدر. عندما يصل الجهد (V_C) إلى الصفر فان الثايروستور (T_5) سوف يطفئ ويترك الثايروستورين (T_1,T_6) في حالة التوصيل، وبالتالي يكون التياران متساويان ومتعاكسان في الاتجاه.

٢-الوضع الثاني:- يحدث عندما يتم قدح الثايروستور (T_2). والشكل (٥-٢٨) يبين الدائرة المكافئة لهذا الوضع:-



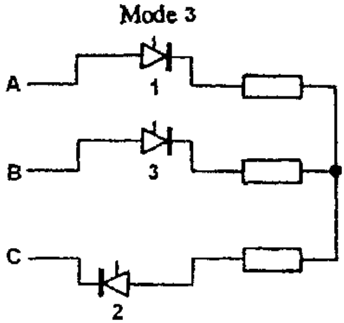
الشكل (٥-٢٨)

الدائرة الكهربائية للوضع الثاني

في هذا الوضع تكون الثايروستورات الثلاثة (T_1,T_2,T_6) موصلة على خط الحيادي للحمل والجهد يساوي صفراً. وجهد الحمل وكذلك التيار يتبعان جهد مصدر التغذية. عندما يصل التيار في الثايروستور (T_6) إلى الصفر فإن هذا الثايروستور يطفئ ويبقى الثايروستوران (T_1,T_2) في حالة التوصيل مجبرة جهد الحيادي إلى الارتفاع عن الصفر.

٣- الوضع الثالث:- يحدث عندما يتم قدح الثايروستور (T_3). والدائرة المكافئة لهذا الوضع مبينة في الشكل (٥-٢٩).

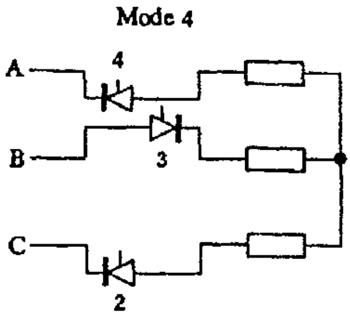
يكرر نفس الوضع السابق حتى يصل التيار الى الصفر ويتم إطفاء الثايروستور (T_1) ويبقى الثايروستورين (T_2, T_3) في حالة التوصيل.



الشكل (٥-٢٩)

الدائرة الكهربائية للوضع الثالث

٤- الوضع الرابع:- ويحدث عندما يتم قدح الثايروستور (T_4) والدائرة المكافئة لهذا الوضع مبينة في الشكل (٥-٣٠).

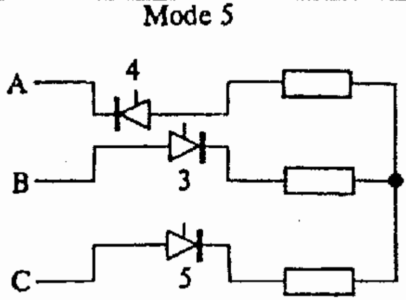


الشكل (٥-٣٠)

الدائرة الكهربائية للوضع الرابع

يكرر نفس الوضع السابق.

٥- الوضع الخامس:- يحدث عندما يتم قدح الثايروستور (T_5) والدائرة المكافئة لهذا الوضع مبينة في الشكل (٥-٣١).

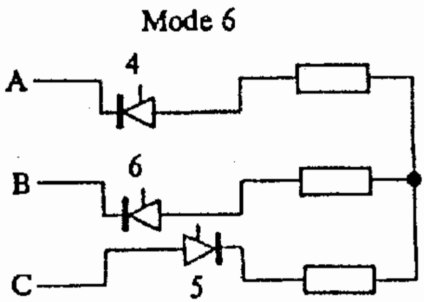


الشكل (٥-٣١)

الدائرة الكهربائية للوضع الخامس

ويكرر نفس الوضع السابق .

٦-الوضع السادس:- يحدث عندما يتم قدح الثايروستور (T_6) والـــدائرة المكافئـــة لهذا الوضع مبينة في الشكل (٥-٣٢).

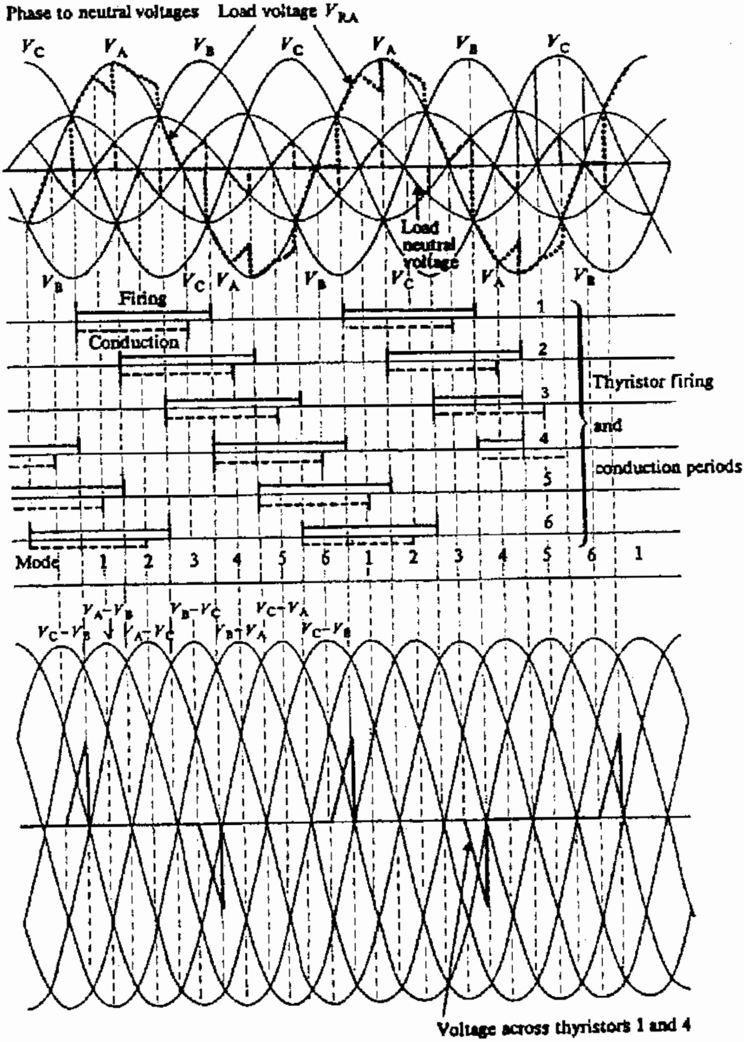


الشكل (٥-٣٢)

الدائرة الكهربائية للوضع السادس

ويكرر نفس الوضع السابق .

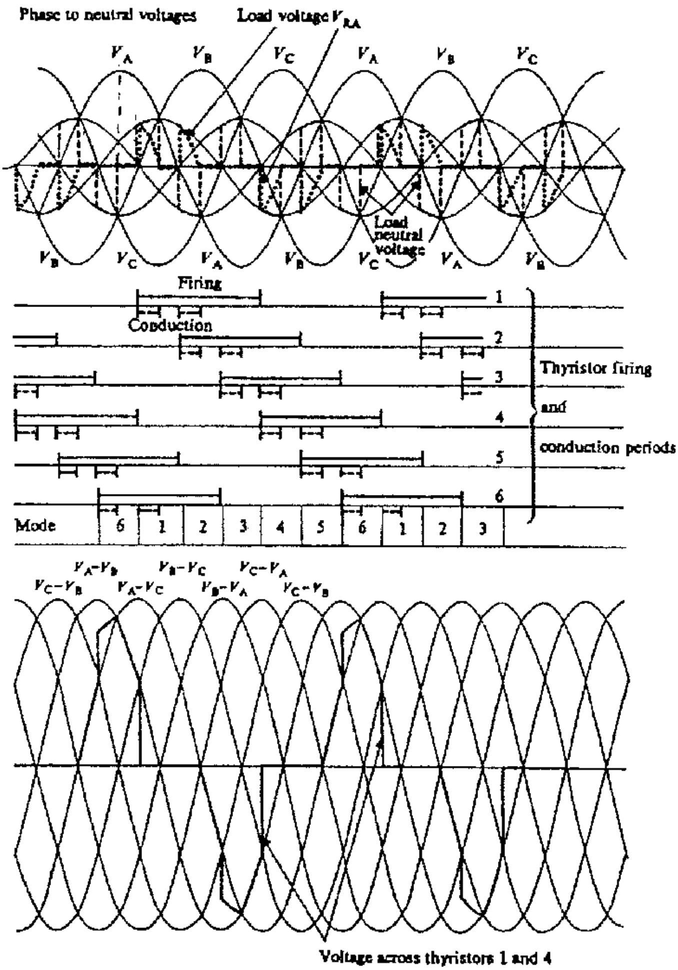
والشكل (٥-٣٣) يبين شكل الموجة على الحمل نتيجة التحليل السابق مـــن اجل زاوية قدح $(\alpha = 30^\circ)$.



الشكل (٥-٣٣)

شكل الموجة على الحمل نتيجة التحليل السابق من اجل زاوية قدح ($\alpha = 30^o$)

والشكل (٥-٣٤) يبين شكل الموجة على الحمل للتحليل السابق من اجل زاوية قدح $(\alpha = 120^\circ)$.



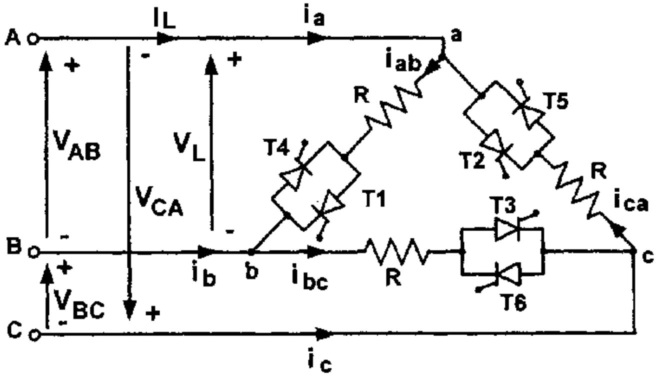
الشكل (٥-٣٤)

شكل الموجة على الحمل للتحليل السابق من اجل زاوية قدح $(\alpha = 120^\circ)$

٥-٤-٣- متحكمات الجهد ثلاثية الأطوار توصيل دلتا موجة كاملة

ومجال التحكم في زاوية القدح يكون محصورا ضمن المجال $(0 \le \alpha \le 150)$.

متحكمات الجهد ثلاثية الأطوار الموصولة بشكل مثلثي، حيث يبين الشكل (٥-٣٥) التوصيل المثلثي لمتحكمات الجهد..



الشكل (٥-٣٥)

متحكم جهد موصول بشكل مثلثي

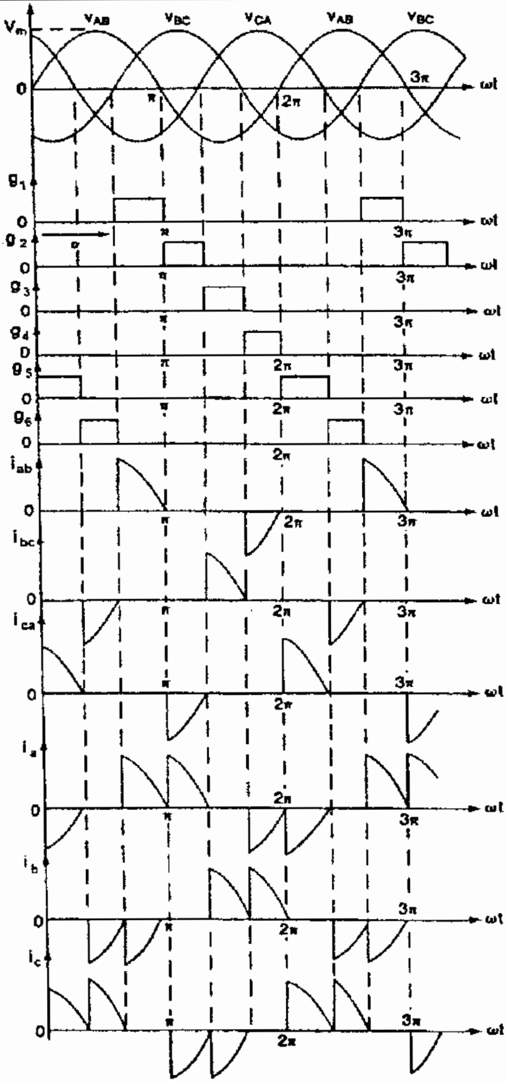
الشكل (٥-٣٦) يبين شكل الموجة على الحمل لهذه المتحكمات.

حيث أن تيار الطور في نظام ثلاثي الطور يساوي $\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$ من تيار الخط، فإن التيار المقرر للثايروستور سوف يكون أقل منه في حال وضع الثايرستور في الخط. نفرض أن جهود الخط اللحظية هي:-

$$v_{AB} = v_{ab} = \sqrt{2}\ V_S Sin(\omega t)$$

$$v_{BC} = v_{bc} = \sqrt{2}\ V_S Sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_{CA} = v_{ca} = \sqrt{2}\ V_S Sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$



For α = 120°

الشكل (٥-٣٦)

شكل الموجة على الحمل لمتحكمات الجهد توصيل مثلثي

جهود الخط للمدخل، وتيارات الخط للطور، وإشارات القدح تظهر في الشكل (٥-٣٦) من أجل زاوية قدح $(\alpha = 120^o)$ وحمل مادي.

للحمل المادي القيمة الفعالة لجهد الطور بالعلاقة التالية:-

$$V_R = \left[\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{2\pi} v_{ab}^2 \ d(\omega t)\right]^{1/2}$$

$$= \frac{2}{2\pi}\sqrt{\int_{\alpha}^{2\pi} 2V_S^2 \ Sin\ \omega t d(\omega t)}$$

$$= V_S\sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\pi - \alpha + \frac{Sin\,2\alpha}{2}\right)} \qquad (5.21)$$

والقيمة العظمى لجهد الخرج يمكن الحصول عليها عندما $(\alpha = 0)$ ومدى التحكم لزاوية القدح تكون $(0 \le \alpha \le \pi)$.

تيارات الخط يمكن الحصول عليها من تيارات الطور حيث:-

$$i_a = i_{ab} - i_{ca} \qquad i_b = i_{bc} - i_{cb} \qquad i_c = i_{ca} - i_{bc} \qquad (5.22)$$

من الشكل (٥-٣٦) تيارات الخط تعتمد على زاوية القدح، ويمكن أن تكون هذه التيارات غير متصلة. القيمة الفعالة لتيارات الخط والطور للحمل يمكن الحصول عليها باستخدام تحليل فورير أو التحليلات العددية (Numerical Solution).

أذا كانت (I_n) القيمة الفعالة لعدد (n) من المركبات التوافقية لتيار الطور، فإن القيمة الفعالة لتيار الطور تحسب من العلاقة:-

$$I_{ab} = \left(I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + \dots\dots + I_n^2\right)^{1/2} \qquad (5.23)$$

أما بالنسبة الى توصيلة الدلتا فإن المركبات التوافقية لتيارات الطور $(n = 3m)$ حيث (m) عدد زوجي , تتدفق حول توصيلة الدلتا ولا تظهر في الخط.

$$I'_{ab} = \left(I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + \dots\dots + I_n^2\right)^{1/2}$$

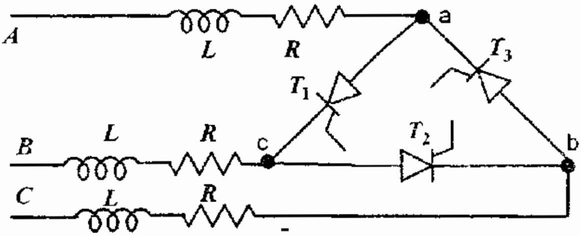
القيمة الفعالة لتيار الخط تساوي:-

$$I_R = \sqrt{3}\sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + ... + I_n^2} \qquad (5.24)$$

نتيجة لذلك فإن القيمة الفعالة لتيارات الخط لنظام ثلاثي الطور سوف تكون أقل من العلاقة المعروفة بين تيار الخط وتيار الطوركما هو واضح في العلاقة التالية:-

$$I_R = \sqrt{3}\ I'_{ab} < \sqrt{3}\ I_{ab} \qquad (5.25)$$

تكون التوصيلة البديلة لحاكمات الجهد ثلاثية الطور توصيلة دلتا والتي تحتوي على ثلاثة ثايروستورات تظهر في الشكل (٥-٣٧) والتي تدعى:-
.(Polygon-connected controller)



الشكل (٥-٣٧)

التوصيلة البديلة لحاكمات الطور توصيلة دلتا

مثال (٥-٧):- نظام ثلاثي الطور توصيلة دلتا موجة كاملة الشكل (٥-٣٥)، لـــه مقاومة حمل $(R = 10\Omega)$ وجهد الخط $(V_S = 208\ V_{rms})$، تردد $(60\,Hz)$ وزاوية قدح $(\alpha = 2\pi/3)$. المطلوب ايجاد :-

١- للقيمة الفعالة لجهد طور الخرج (V_R).

٢- التعبير اللحظي للتيارات $(i_{ca}\ , i_{ab}\ \ , i_R)$.

٣- القيمة الفعالة لتيار الطور (I_{ab}) وتيار الخط (I_a).

٤- معامل القدرة (PF).

٥- القيمة الفعالة لتيار الثايروستور (I_{RT}).

الحل:-

القيمة العظمى لتيار الطور $I_m = \frac{\sqrt{2} \times 208}{10} = 29.4\ A$

١- من المعادلة (٥-٢١) فإن (V_o):-

$$V_R = V_S \sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\pi - \alpha + \frac{Sin\,2\alpha}{2}\right)} = 92\ V$$

٢- أذا تم فرض (i_{ab}) المتجه المرجعي وكان $(i_{ab} = I_m\, Sim\ \omega t)$، فإن التيارات اللحظية تساوي:-

$$For \quad 0 \le \omega t < \frac{\pi}{3} : \Rightarrow i_{ab} = 0$$

$$i_{ca} = I_m\ Sin\left(\omega t - {}^{4\pi}\!/_{3}\right)$$

$$i_a = i_{ab} - i_{ca} = -I_m\ Sin\left(\omega t - {}^{4\pi}\!/_{3}\right)$$

$$For \quad \frac{\pi}{3} \le \omega t < \frac{2\pi}{3} :\Rightarrow i_{ab} = i_{ca} = i_a = 0$$

$$For \quad \frac{2\pi}{3} \le \omega t < \pi :\Rightarrow i_{ab} = I_m\ Sin\left(\omega t\right)$$

$$i_{ca} = 0$$

$$i_a = i_{ab} - i_{ca} = -I_m\ Sin\left(\omega t\right)$$

$$For \quad \pi \le \omega t < \frac{4\pi}{3} :\Rightarrow i_{ab} = 0$$

$$i_{ca} = I_m\ Sin\left(\omega t - {}^{4\pi}\!/_{3}\right)$$

$$i_a = i_{ab} - i_{ca} = -I_m\ Sin\left(\omega t - {}^{4\pi}\!/_{3}\right)$$

$$For \quad \frac{4\pi}{3} \le \omega t < \frac{5\pi}{3} :\Rightarrow i_{ab} = i_{ca} = i_a = 0$$

$$For \quad \frac{5\pi}{3} \le \omega t < 2\pi :\Rightarrow i_{ab} = I_m \; Sin\left(\omega t\right)$$

$$i_{ca} = 0$$

$$i_a = i_{ab} - i_{ca} = -I_m \; Sin\left(\omega t\right)$$

٣- القيمة الفعالة لـ $\left(i_a \; , \; i_{ab}\right)$ يمكن الحصول عليها باستخدام التحليلات العددية عن طريق برنامج كمبيوتر، حيث:-

$$I_{ab} = 9.32 \; A \qquad I_L = I_a = 13.18 \; A$$

$$\frac{I_a}{I_{ab}} = \frac{13.18}{9.32} = 1.414 \ne \sqrt{3}$$

٤- قدرة الخرج:-

$$P \; = 3 \; I_{ab}^2 \; R = 3 \times \left(9.32\right)^2 \times 10 = 2605.9 \; watt$$

٥- القدرة الظاهرية بـ $\left(VA\right)$.

$$P_{VA} = 3 \; V_S I_{ab} = 3 \times 208 \times 9.32 = 5815.7 \; VA$$

$$PF = \frac{P}{P_{VA}} = \frac{2605.9}{5815.7} = 0.448 \;\; (Lagging)$$

٦- تيار الثايروستور:-

$$I_{RT} = \frac{I_{ab}}{\sqrt{2}} = \frac{9.32}{\sqrt{2}} = 6.59 \; A$$

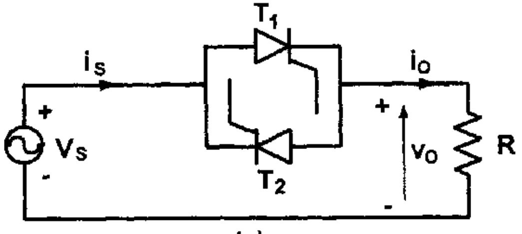
٥-٥- تصميم دوائر متحكمات الجهد

Design of Ac Voltage-Controller Circuits

محددات عناصر المتحكم يجب أن تصمم لتتحمل أسوء الظروف بالنسبة إلى العمل، والتي تنشأ عندما يقوم المتحكم بتزويد الحمل بالقيمة الفعالة العظمى لجهد الخرج. مرشحات دوائر الدخل ودوائر الخرج يجب أن تصمم لتوافق أسوء الظروف. والدخل للمتحكم يحتوي على عدد من التوافقيات وكذلك لابد من تحديد

زاوية القدح التي تؤدي إلى أسوء ظروف العمل. والخطوات المتبعة في تصميم دوائر المتحكمات هي مشابهة للخطوات المتبعة في تصميم دوائر التقويم التي تم شرحها سابقا.

مثال (٥-٨):- متحكم جهد أحادي الطور موجة كاملة المبين في الشكل (٥-٣٨)، يقوم بالتحكم بالقدرة الناتجة عن مصدر جهد $(V_S = 230V)$ بتردد $(f = 50Hz)$ والمزودة الى حمل مادي (R). القيمة العظمى لقدرة الخرج تساوي إلى $(10KW)$.



الشكل (٥-٣٨)

المطلوب حساب:-

١-القيمة العظمى للقيمة الفعالة لتيار الثايروستور.

٢-القيمة العظمى للقيمة المتوسطة لتيار الثايروستور.

٣-القيمة العظمى لتيار الثايروستور والقيمة العظمى للجهد على الثايروستور.

الحل :-

$$P_o = 10KW, V_S = 230V$$
$$V_m = \sqrt{2}V_S = \sqrt{2} \times 230 = 325.3V$$

يتم الحصول على القيمة العظمى في الحمل عندما تكون $(\alpha = 0)$.

من علاقة القيمة الفعالة للجهد:-

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\pi - \alpha + \frac{Sin2\alpha}{2}\right)}$$

$$\alpha = 0 \Rightarrow V_{rms} = \frac{\sqrt{2}\times 230}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{\pi}(\pi - 0 + 0)} = V_S = 230V$$

$$P_o = I_{rms}^2 \times R = \frac{V_{rms}^2}{R} = 10000W \Rightarrow R = \frac{(230)^2}{10000} = 5.29\Omega$$

القيمة العظمى للقيمة الفعالة للتيار تساوي:-

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{230}{5.29} = 43.48A$$

والقيمة العظمى للقيمة الفعالة لتيار الثايروستور تساوي :-

$$I_{RT} = \frac{I_{rms}}{\sqrt{2}} = \frac{43.48}{\sqrt{2}} = 30.75A$$

القيمة العظمى للقيمة المتوسطة لجهد الحمل تساوي:-

$$V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi}(Cos\alpha + 1)$$

$$\alpha = 0 \Rightarrow V_{dc} = \frac{\sqrt{2}\times 230}{2\pi}(1+1) = 103.55V$$

القيمة العظمى للقيمة المتوسطة للتيار تساوي:-

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{103.55}{5.29} = 19.57A$$

القيمة العظمى للقيمة المتوسطة لتيار الثايروستور تساوي:-

$$I_{DT} = I_{dc} = 19.57A$$

القيمة العظمى لجهد الثايروستور تساوي:-

$$V_p = V_m = 325.3V$$

القيمة العظمى لتيار الثايروستور تساوي:-

$$I_P = \frac{V_P}{R} = \frac{325.3}{5.29} = 61.5A$$

٥-٦- المحولات الدوارة (Cycloconverters) :-

مقدمة:-

متحكمات الجهد المتناوب تعطي جهد متغير بتردد ثابت، وتكون التوافقيات مرتفعة في دوائر الخرج وخاصة عند الأحمال المنخفضة. عند استخدام محول ذو مرحلتين (Tow-Stage Conversions) يمكن الحصول على جهد متغير بتردد متغير.

أمثلة:-

- عند تحويل من جهد (Ac) ثابت الى جهد (Dc) متغير يتم استخدام مقوم محكوم.
- عند تحويل جهد (Dc) متغير إلى جهد (Ac) بتردد متغير يتم باستخدام العاكسات (Inverters).

إن استخدام المحولات الدوارة (Cycloconverters) يمكن تقليل الحاجة إلى استخدام محول أو أكثر.

والمحول الدوار هو محول يقوم بتحويل جهد (Ac) بتردد معين إلى جهد (Ac) بتردد مختلف بعملية تحويل من (Ac) الى (Ac) دون وصل محول جديد.

إن غالبية المحولات الدوارة يتم التبديل فيها باستخدام التبديل الطبيعي (Naturally Commutated) وتردد الخرج الأعظمي محكوم إلى قيمة جزئية من تردد موجة الدخل الأساسية.

وتستخدم هذه المحولات في التطبيقات لمحركات التيار المتناوب ذات السرعات المنخفضة وبقدرات تصل إلى $(15000KW)$ بترددات من $(0 \to 20Hz)$.

٥-٦-١- أنواع المحولات الدوارة

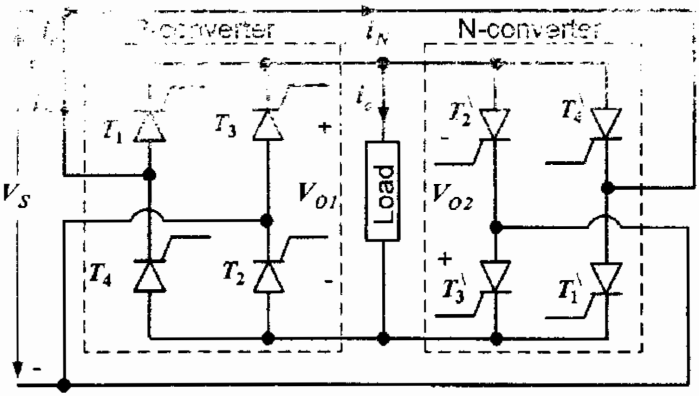
١- المحولات الدوارة أحادية الطور/أحادية الطور:-

Single-Phase/Single-Phase Cycloconverters

مبدأ العمل :-

يمكن شرح مبدأ العمل لهذه المحولات بمساعدة الشكل (٥-٣٩)، حيث يبين الدائرة المكافئة لمحول دوار أحادي الطور.

يتألف هذا النوع من المحولات الدوارة كما هو واضح في الشكل من محولين أحادي الطور موصولان بشكل متعاكس.



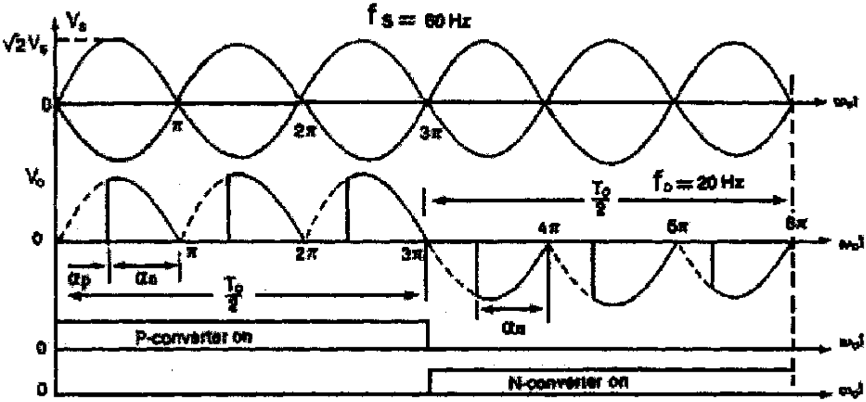
الشكل (٥-٣٩)

الدائرة المكافئة لمحول دوار أحادي الطور

ويعمل المحولان أحادي الطور على شكل مقوم جسري. بحيث تؤخذ زاوية القدح للمحول الأول مساوية بالقيمة ومعاكسة لزاوية القدح للمحول الثاني. إذا

رمزنا للمحول الأول بالرمز (P) وكان هذا المحول يعمل بمفردة تكون القيمة المتوسطة لجهد الحمل موجبة.

إذا رمزنا للمحول الثاني بالرمز (N)، وكان هذا المحول يعمل بمفردة تكون القيمة المتوسطة لجهد الحمل سالبة. الشكل (٥-٤٠) يبين شكل الموجة على الحمل في حال كون الحمل حملا ماديا.



الشكل (٥-٤٠)

شكل الموجة على الحمل في حالة الحمل المادي

إذا كانت زاوية القدح للمحول الأول (α_p)، فان زاوية القدح للمحول الثاني تساوي:-

$$\alpha_N = \pi - \alpha_p$$

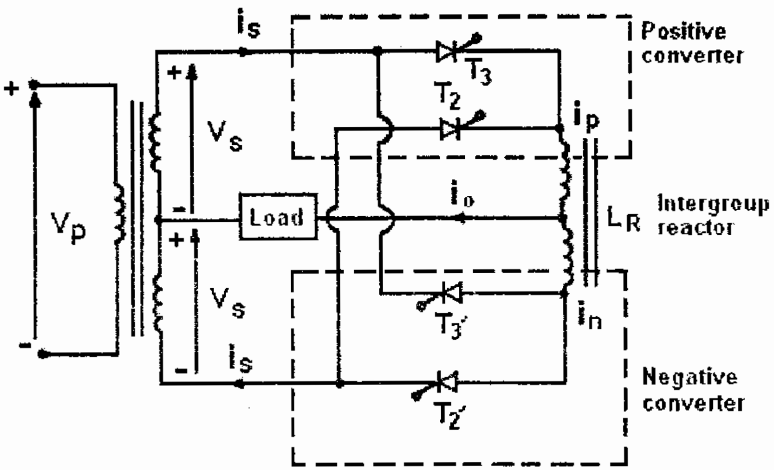
والتردد لموجة الدخل $\left(f = \frac{1}{T}\right)$، حيث أن (T) هو الزمن الدوري لموجة الدخل.

وفي حالة عمل كلا المحولين في نفس الوقت فان القيمة المتوسطة لجهد الحمل للمحول الأول تساوي في القيمة وتعاكس في الاتجاه القيمة المتوسطة لجهد الحمل للمحول الثاني.

$$V_{(av)P} = -V_{(av)N}$$

القيمة اللحظية لجهد الخرج لكلا المحولين يمكن أن تكون غير متساوية وهنالك احتمال كبير لظهور تيارات دوارة ذات توافقيات عالية في الدائرة.

ويمكن الحد من هذه التوافقيات (التيارات الدوارة) باستخدام محولات $(Center - Tapped)$ كما هو مبين في الشكل (٥-٤١).



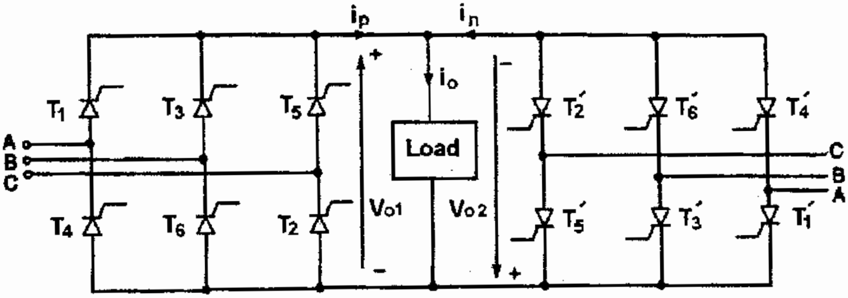
الشكل (٥-٤١)

محول دوار $(Center - Tapped)$

٢- المحولات الدوارة أحادية الطور / ثلاثية الأطوار

Three-Phase/Single-Phase Cycloconverters

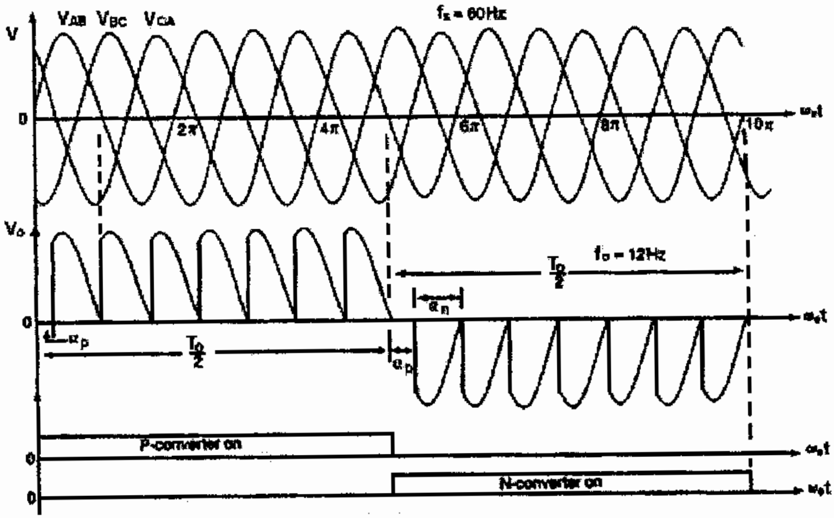
يبين الشكل (٥-٤٢) طريقة توصيل هذا النوع من المحولات. المقومات من $(Ac \rightarrow Dc)$ المستخدمة هي مقومات محكومة ثلاثية الطور.



الشكل (٥-٤٢) محول دوار ثلاثي الطور

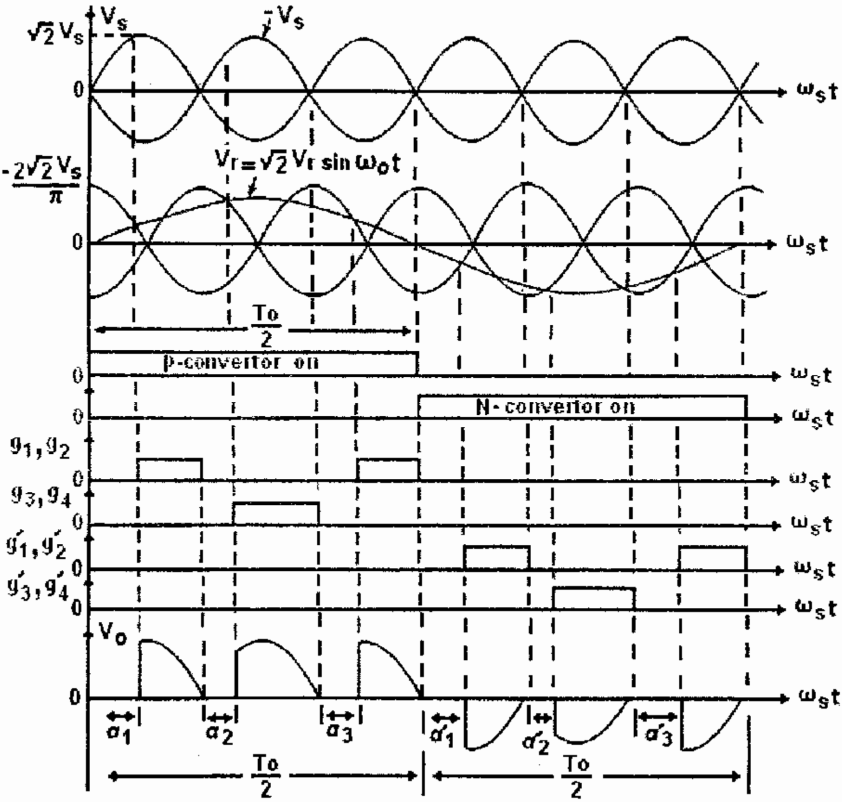
يبين الشكل (٥-٤٣) شكل موجة الدخل وشكل الموجة على الحمل من أجل حمـــلاً مادياً في حال تردد المحولين يساوي $(12Hz)$.

حيث يعمل المقوم الأول (الموجب) (P) خلال نصف الفترة لتردد الخرج ويعمل المقوم الثاني (السالب) (N) خلال النصف الأخر لتردد موجة الخرج .



الشكل (٥-٤٣) شكل موجة الدخل وشكل الموجة على الحمل من أجل حملاً مادياً في حال تردد المحولين يساوي $(12Hz)$

والشكل (٥-٤٤) يبين شكل الموجة على الحمل وفترات التوصيل لكل محول وفترات التوصيل للثايروستورات المستخدمة.



الشكل (٥-٤٤)

يبين شكل الموجة على الحمل وفترات التوصيل لكل محول

وفترات التوصيل للثايروستورات

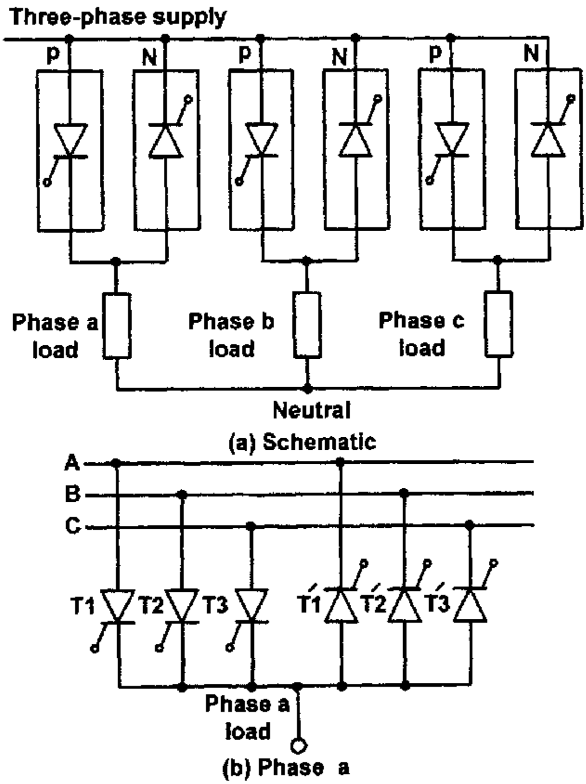
التحكم بمحركات التيار المتناوب ثلاثية الأطوار يتم باستخدام مصادر جهد ثلاثية الأطوار بتردد متغير. ويمكن استخدام هذا النوع من المحولات من اجل الحصول على دوائر خرج ثلاثية الأطوار باستخدام محولات أحادية الطور. ويتطلب في هذه

الحالة استخدام (18) ثايروستور في حالة استخدام محولات ثلاثية الطور نصف موجة، ويستخدم (36) ثايروستور في حالة استخدام محولات ثلاثية الطور موجة كاملة.

٣- محولات ثلاثية الطور/ثلاثية الطور

Three-Phase/Three-Phase Cycloconverters

في هذه الحالة يتم استخدام ثلاثة محولات ثلاثية الأطوار. ويبين الشكل (٥-٤٥) توصيل هذا النوع من المحولات.



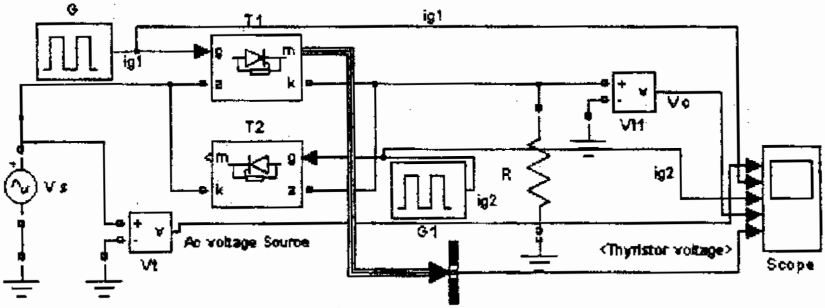
الشكل (٥-٤٥) محولات ثلاثية الطور/ثلاثية الطور

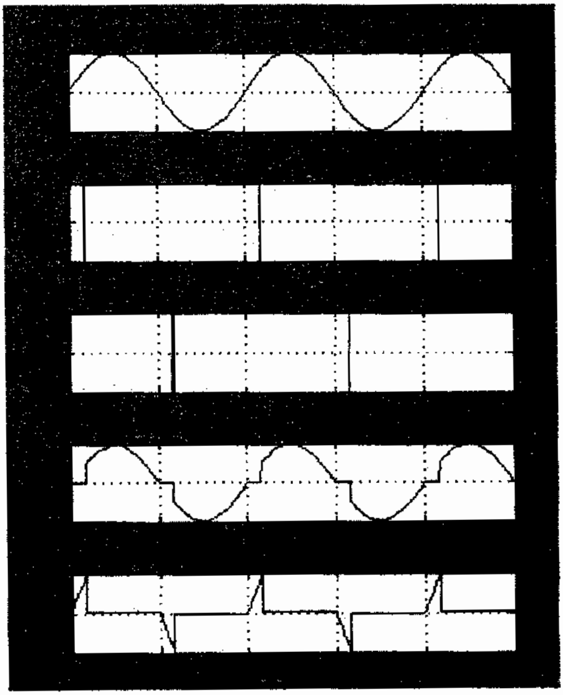
ملخص:-

- متحكمات الجهد المتناوب يمكن أن تستخدم تحكم $(ON-OFF)$ او تحكم $(Phase-Angle)$.
- استخدام تحكم $(ON-OFF)$ مناسب للأنظمة التي لها ثابت زمني مرتفع.
- تستخدم متحكمات الجهد موجة كاملة (Bi-directional) أكثر من متحكمات الجهد نصف موجة (Unidirectional) نتيجة وجود تشويش ناتج من التوافقيات في متحكمات الجهد أحادية الاتجاه.
- العمليات الحسابية في حالة استخدام الحمل الحثي تكون معقدة.
- معامل قدرة دائرة الدخل للتحكم يكون منخفضا ويعتمد على زاوية القدح خصوصا في الدوائر ذات الأحمال المنخفضة.
- متحكمات الجهد تعطي جهد خرج بتردد ثابت. ويمكن وصل محولين مع بعضهما للحصول على محول مضاعف يمكن أن يعمل كمغير للتردد يعرف بالمحول الدوار.

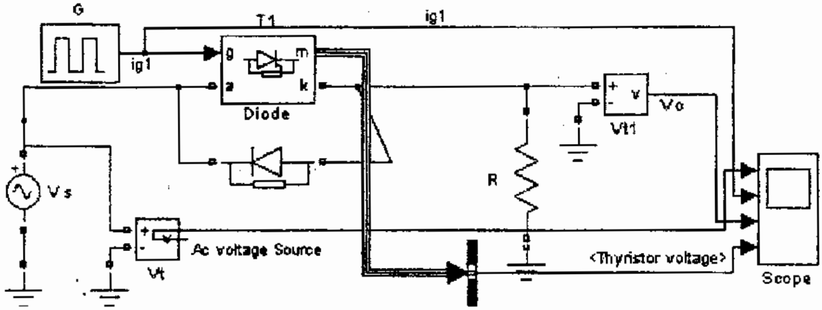
٥-٧- الدوائر العملية والحل الرياضي باستخدام برنامج (Math-Lab)

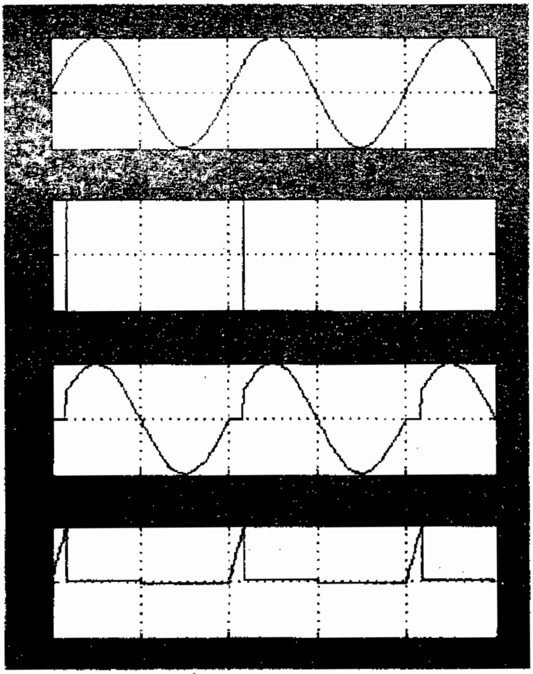
٥-٧-١- دائرة حاكم الجهد أحادي الطور (حمل مادي)





٥-٧-٢- دائرة حاكم الجهد أحادي الطور نصفي (حمل مادي)





الوحدة السادسة

المقطعات

الوحدة السادسة

المقطعات

DC Choppers

مقدمة:-

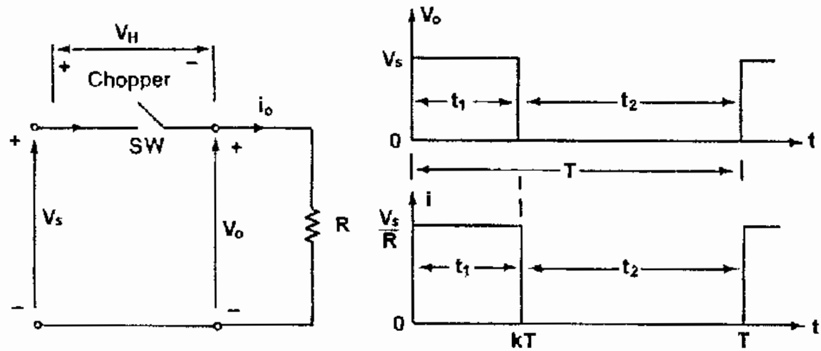
تقوم المقطعات بتحويل جهد (dc) ثابت إلى جهد (dc) متغير. وهي عبارة عن محولات من (dc) إلى (dc). والمقطع يمكن أعتباره مكافئ لمحول (ac) بعدد لفات متغير ويمكن أن يكون خافض للجهد أو رافع للجهد. ولمعرفة مبدأ عمل المقطع، هنالك حالتين من عمل المقطع وهما:-

١- مقطع خافض للجهد.

٢- مقطع رافع للجهد.

٣- [illegible] Class (A) [illegible]

[illegible] عمل المقطع من الصنف (A) [illegible] الدائرة المكافئة المبينة في الشكل (٦-١).



الشكل (٦-١)

دائرة مقطع خافض للجهد

عندما يتم إغلاق المفتاح (SW) لفترة زمنية (t_1)، فــإن جهــد المــدخل (V_S) يظهر خلال الحمل، أما إذا بقي المفتاح (SW) مغلقاً لفترة زمنية (t_2) فإن الجهد على أطراف الحمل يساوي صفراً والإشكال الموجيية لجهد الخرج تظهر في الشكل (٦-١). المفتاح يمكن أن يكون أما (BJT) أو $(MOSFT)$ أو (GTO) أو ثايروستور بتبديل قصري. والعنصر المستخدم يمكن أن يكون عليه هبــوط فــي الجهد مقداره من $(0.5V-2V)$ والذي يمكن إهماله أثناء إجراء العمليات الحــسابية اللازمة.

تحديد القيمة المتوسطة للمخرج من خلال العلاقة:-

$$V_{dc}=\frac{1}{T}\int_0^{t_1} v_o\ dt=\frac{t_1}{T}V_S=f.t_1.V_S=K.V_S \qquad (6.1)$$

والقيم المتوسطة لتيار الحمل تحسب من العلاقة:-

$$I_{dc}=\frac{V_{dc}}{R}=K.\frac{V_S}{R}$$

$$K=f.t_1=\frac{t_1}{T}=\frac{t_1}{t_1+t_2} \qquad (6.2)$$

حيث أن:- T :- هو الزمن الدوري .

K :- هو زمن الدوري للمقطع $(duty\quad cycle)$.

f :- هو تردد المقطع.

يمكن إيجاد القيمة الفعالة لجهد المخرج من العلاقة:-

$$V_{rms}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{KT} v_o^2 dt}=\sqrt{K}V_S \qquad (6.3)$$

تكون قدرة المخرج للمقطع مساوية قدرة الدخل وتعطى القيمة المتوسطة للقدرة بالعلاقة:-

$$P_t = \frac{1}{T}\int_0^{KT} v_o . i\, dt = \frac{1}{T}\int_0^{KT} \frac{v_o^2}{R}\ dt = K\frac{V_S^2}{R} \qquad (6.4)$$

والمقاومة الفعالة لدائرة الدخل من جهد الخرج تساوي:-

$$R_i = \frac{V_S}{I_{dc}} = \frac{V_S}{K\frac{V_S}{R}} = \frac{R}{K} \qquad (6.5)$$

يمكن تغيير الزمن الدوري (Duty Cycle) (K) من الصفر إلى الواحد، بتغيير زمن التوصيل (t_1) أو الزمن الدوري أو التردد. وبالتالي يمكن تغيير جهد الخرج من الصفر إلى (V_S) بالتحكم بالزمن الدوري (Duty Cycle) وبالتالي يتم التحكم بقدرة الخرج.

ويقسم مبدأ العمل لهذه المقطعات إلى نوعين أساسين:-

١- العمل بتردد ثابت (Constant Frequency Operation) :- في هذه الحالة يتم تثبيت التردد للمقطع (أو الزمن المقطع (T)) وزمن التوصيل (t_1)يتم تغيره، أي يتم التحكم بعرض النبضة وهو ما يسمي بالتحكم بعرض الموجة (Pulse Width Modulation) (PWM).

٢- العمل بتردد متغير (Variable Frequency Operation):- في هذه الحالة يكون التردد متغير ويتم تثبيت زمن التوصيل (t_1) أو زمن القطع (t_2) وهو ما يدعى بالتحكم بالتردد. وفي هذه الحالة لا بد من تغيير التردد بمجال مرتفع من أجل الحصول على جهد خرج كامل، وهذا النوع من التحكم يتيح وجود عدد كبير من التوافقيات. ويكون تصميم المرشحات لهذه الدائرة معقدا.

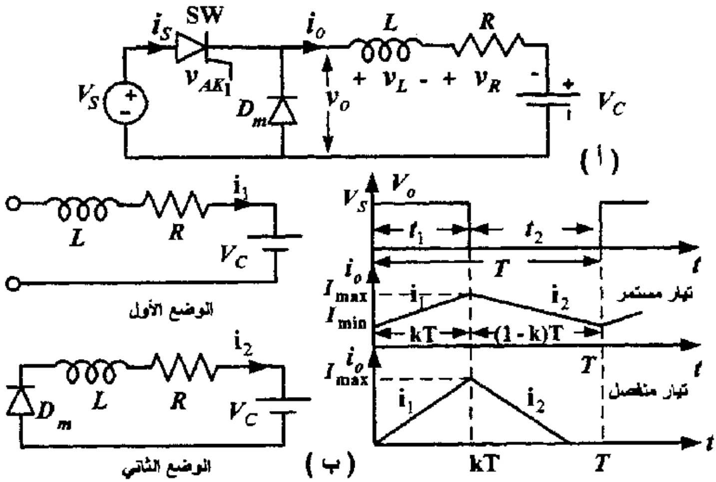
٦-١-١- المقطع الخافض بحمل حثي مادي ومصدر جهد ثابت (V_C)

Step Down Class (A) Chopper with (RL) Load (DC source)

يبين الشكل (٦-٢- أ) دائرة مقطع خافض بحمل حثي مادي ومصدر جهد ثابت . ويمكن تقسيم عمل الدائرة إلى وضعين:-

١- الوضع الاول:- خلال هذا الوضع يتم توصيل المفتاح (SW) ويمر التيار إلى الحمل من المصدر.

٢- الوضع الثاني:- يتم فصل المفتاح ويستمر التيار بالمرور إلى الحمل من خلال الديود (D_m). والدائرة المكافئة لكلا الوضعين والشكل الموجي وتيار الحمل مبينة في الشكل (٦-٢- ب).



الشكل (٦-٢) دائرة مقطع خافض بحمل حثي ومصدر جهد ثابت $R\,LE$

تيار الحمل للوضع الأول يمكن حسابه من العلاقة:-

$$V_S = R.i_o + L\frac{di_o}{dt} + V_c \qquad (6.6)$$

$$R\,i_o + L\frac{di_o}{dt} = V_S - V_C$$

$$\frac{R}{L}.i_o+\frac{di_o}{dt}=\frac{V_S-V_C}{L} \qquad (V_S=V_C) \qquad (6.7)$$

الحل العام لهذه المعادلة يكون من الشكل:-

$$i(t)=i_F+i_N \qquad (6.8)$$

وفي الحالة الستاتيكية فإن:-

$$\frac{di_1}{dt}=0$$

وبذلك فإن قيمة التيار في المركبة الإجبارية يساوي:-

$$i_F=\frac{V_S-V_C}{R} \qquad (6.9)$$

وقيمة التيار في المركبة الطبيعية تحسب من الحالة الديناميكية:-

$$i_N=Ae^{-t/\tau} \quad , \quad \tau=\frac{L}{R} \qquad (6.10)$$

وبالتالي فإن الحل العام يكون:-

$$i_o=\frac{V_S-V_C}{R}+A\,e^{-t/\tau} \qquad (6.11)$$

يتم حساب قيمة الثابت (A) من الشروط الابتدائية في اللحظة $(t=0)$ فإن $(i_o=I_{min} \quad , \quad v_o=V_S)$:-

$$I_{min}=\frac{V_S-V_C}{R}+A\,e^{-t/\tau} \Rightarrow A=I_{min}-\left(\frac{V_S-V_C}{R}\right) \qquad (6.12)$$

$$i_o=\frac{V_S-V_C}{R}+I_{min}\,e^{-t/\tau}-\left(\frac{V_S-V_C}{R}\right)e^{-t/\tau} \qquad (6.13)$$

$$i_o=\frac{V_S-V_C}{R}\left[1-e^{-t/\tau}\right]+I_{min}\,e^{-t/\tau} \qquad (6.14)$$

نحدد قيمة (I_{max}) عند $(t=t_{ON})$ وبذلك تكون $(i_o=I_{max})$:-

$$i_o=I_{max}=\frac{V_S-V_C}{R}\left[1-e^{-t_{ON}/\tau}\right]+I_{min}\,e^{-t_{ON}/\tau} \qquad (6.15)$$

تحدد قيمة (I_{min}) عند فصل المفتاح كما في الوضع الثاني.

لحظة فصل المفتاح عند $(t'=0^+)$ فإن الجهد $(v_o=0)$ وتكون قيمـــة التيـــار (i_o) تساوي التيار (I_{max}).

$$i_o = \frac{-V_C}{R}\left[1-e^{-t'/\tau}\right]+I_{max}\,e^{-t'/\tau} \qquad (6.16)$$

وعندما $(t'=T-t_{on})$ أو $(t=T)$ تكون قيمة التيار $(i_o=I_{min})$:-

$$i_o = I_{min} = \frac{-V_C}{R}\left[1-e^{-(T-t_{on})/\tau}\right]+I_{max}\,e^{-(T-t_{on})/\tau} \qquad (6.17)$$

إذا كانت قيمة $(t_{ON}=T)$ فإن:-

$$I_{max} = I_{min} = \frac{V_S-V_C}{R} \qquad (6.18)$$

في حالة العمل بالتيار الغير متصل (Discontinuous Mode) عند الزمن $(t=t_k)$ فإن $(I_{min}=0)$.

$$i_o = \frac{V_S-V_C}{R}\left[1-e^{-t/\tau}\right] \qquad (6.19)$$

عند الزمن $(t=t_{ON})$ فإن $(i_o=I_{max})$.

$$i_o = I_{max} = \frac{V_S-V_C}{R}\left[1-e^{-t_{ON}/\tau}\right] \qquad (6-20)$$

في حالة العمل بالتيار المتصل (Continuous Current) فإن:-

$$I_{max} = \frac{V_S-V_C}{R}\left[1-e^{-t_{ON}/\tau}\right]+I_{min}\,e^{-t_{ON}/\tau} \qquad (6.21)$$

$$I_{min} = \frac{-V_C}{R}\left[1-e^{-(T-t_{ON})/\tau}\right]+I_{max}\,e^{-(T-t_{ON})/\tau} \qquad (6.22)$$

وبحل المعادلتين يكون:-

$$I_{max} = \frac{V_S}{R}\ \frac{\left[1 - e^{-t_{ON}/\tau}\right]}{\left[1 - e^{-T/\tau}\right]} - \frac{V_C}{R} \quad (6.23)$$

$$I_{min} = \frac{V_S}{R}\ \frac{\left[e^{t_{ON}/\tau} - 1\right]}{\left[e^{T/\tau} - 1\right]} - \frac{V_C}{R} \quad (6.24)$$

وفي حالة التيار الغير متصل (Discontinuous Current) فإن:-

$$I_{max} = \frac{V_S - V_C}{R}\ \left[1 - e^{-t_{ON}/\tau}\right] \quad (6.25)$$

$$I_{min} = 0 \quad (6.26)$$

يكون التيار $(I_{min} = 0)$في حالة التيار الغير متصل عند الزمن (t_x) أقل من (T)، وهذا الزمن يحسب من العلاقة:-

$$t_x = \tau\ .\ \ln\left\{e^{-t_{ON}/\tau}\left[1 + \frac{V - V_C}{V_C}\left(1 - e^{-t_{ON}/\tau}\right)\right]\right\} \quad (6.27)$$

وحتى يكون التيار غير متصل، فإن قيمة الزمن تكون $(T_{ON} < t_x < T)$. ويمكن تحديد عمل المقطع بشكل متصل أو غير متصل بالنسبة للتيار باستخدام العلاقة بين:- $\left(m = \frac{V_C}{V_S}\right)$ و $\left(\rho = \frac{T_{x\,on}}{T}\right)$ من أجل قيم مختلفة لـــ $\left(\sigma = \frac{T}{\tau}\right)$.

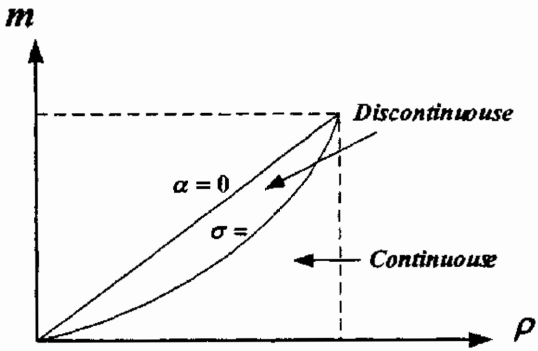
$$\rho = \frac{T_{x\,on}}{T} = \frac{e^{\rho.\sigma} - 1}{e^{\sigma} - 1} \quad (6.28)$$

أذا كانت:- $\rho = \frac{T_{x\,on}}{T} < \frac{t_{on}}{T} = K$

يكون التيار متصل، وإذا كانت:-

$$\rho = \frac{T_{xon}}{T} > \frac{t_{on}}{T} = K$$

يكون التيار غير متصل، كما في الشكل (٦-٣).



الشكل (٦-٣)

مناطق عمل التيار المستمر والغير مستمر

ولكن عند استخدام تحليل فورير من أجل تحليل عمل الدائرة للمقطع في حال كون التيار للمخرج متصل او غير متصل على النحو التالي:-

$$v_o = V_o + \sum_{n=1}^{\infty} a_n Sin\ n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n Cos\ n\omega t$$

$$= V_o + \sum_{n=1}^{\infty} C_n Sin\ (n\omega t + \theta_n) \qquad (6.29)$$

حيث أن (ω) تردد القطع الزاوي $(rad / Sec.)$ وتساوي $\left(\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f\right)$.

من أجل التيار الغير مستمر فإن القيمة المتوسطة الخارجة على أطراف الحمل في الحالة العامة تعطى بالعلاقة:-

$$V_o = \frac{1}{T}\int_0^T v_o\, dt = \frac{1}{T}\left[\int_0^{t_{ON}} V_S\, dt + \int_{t_x}^{T} V_C\, dt\right] \qquad (6.30)$$

$$V_o = \frac{t_{on}}{T} V_S + \left(\frac{T - t_x}{T}\right) V_C \qquad (6.31)$$

وكحالة خاصة أذا كان التيار متصل فإن $(t_x = T)$ وبالتالي فإن:-

$$V_o = \frac{t_{on}}{T} V_S = KVs \qquad (6.32)$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T v_o Sin\ n\omega t\ d\omega t$$

$$= \frac{V_S}{n\pi}\left[1 - Cos\, n\omega t_{on}\right] - \frac{V_C}{n\pi}\left[1 - Cos\, n\omega t_x\right] \qquad (6.33)$$

وفي حالة كون التيار متصل يكون $(t = t_x)$، وبالتالي فإن:-

$$a_n = \frac{V_S}{n\pi}\left[1 - Cos\, n\omega t_{on}\right] \qquad (6.34)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T v_o Cos\ n\omega t\ d\omega t$$

$$= \frac{V_S}{n\pi}\left(Sin\, n\omega t_{on}\right) - \frac{V_C}{n\pi}\left(Sin\, n\omega t_x\right) \qquad (6.35)$$

وفي حالة كون التيار متصل يكون $(t = t_x)$، وبالتالي فإن:-

$$b_n = \frac{V}{n\pi}\left(Sin\, n\omega t_{on}\right)$$

$$C_n = \sqrt{a_n^{\ 2} + b_n^{\ 2}} \Rightarrow t_x = T \Rightarrow C_n = \frac{\sqrt{2}.V_S}{n\pi}\sqrt{1 - Cos\, n\omega t_{ON}} \qquad (6.36)$$

$$\theta_n = \tan^{-1}\frac{b_n}{a_n} \quad \Rightarrow \theta_n = \tan^{-1}\frac{Sin\, n\omega t_{on}}{1 - Cos\, n\omega t_{on}} \qquad (6.37)$$

القيمة العظمى الفعالة والمتوسطة للتيار المار من خلال العناصر المستخدمة في المقطع تكون عند $(t_{on} = T)$ وتساوي:-

$$I_{SR\max} = I_{S\max} = \frac{V_S - V_C}{R} \qquad (6.38)$$

حيث أن $(I_{SR\max})$: القيمة الفعالة.

القيمة التقريبية للتيار المار من خلال ديود الانطلاق الحر (Freewheeling Diode) على فرض حثية دائرة الحمل كبيرة بشكل كافٍ للمحافظة على (i_o) عند قيمة ثابتة.

$$I_o = \frac{V_o - V_C}{R} = \frac{t_{ON}}{T} \times \frac{V}{R} - \frac{V_C}{R} \qquad (6.39)$$

القيمة المتوسطة للتيار المار من خلال الديود تكون:-

$$I_D = \frac{T - t_{on}}{T} I_o = \frac{T - t_{on}}{RT}\left[\frac{t_{on}}{T} V_S - V_C\right] \qquad (6.40)$$

نحصل على القيمة العظمى عندما:-

$$\frac{dI_D}{dt_{on}} = \frac{1}{RT}\left[1 - \frac{2\,t_{on}}{T}\right] V_S - V_C = 0 \qquad (6.41)$$

حيث أن: $\frac{t_{on}}{T} = \frac{V_S + V_C}{2V_S}$

فإن $I_{D\max} = \left(1 - \frac{V_C}{V_S}\right)$

وتكون الحالة الأسوأ عندما يكون الجهد $(V_C = 0)$ وبالتالي فإن:-

$$I_{D\max} = \frac{V_S}{4R} \quad , \quad \frac{t_{on}}{T} = \frac{1}{2} \qquad (6.42)$$

القيمة الفعالة لتيار الديود حسب الشروط في المعادلة (٦-٤٢) تساوي:-

$$I_{DR\max} = \frac{1}{T}\sqrt{\int_{T/2}^{T}\left(\frac{V_S}{2R}\right)^2 dt} = \frac{V_S}{2\sqrt{2}R} \qquad (6.43)$$

مثال (٦-١):- لمقطع من نوع خافض للجهد صنف (Class A) فيه:-

$$V_s = 110\,V \;,\; L = 1mH \;,\; R = 0.25\Omega \;,\; V_C = 11V \;,\; T = 2500\mu S$$

$$t_{ON} = 1000\mu S$$

المطلوب حساب:-

١- القيمة المتوسطة للتيار (I_o) وفولطية المخرج (V_o).

٢- القيمة العظمى والصغرى للتيار $(I_{max}\;,\;I_{min})$.

٣- رسم المنحنيات لكل من $(i_{G1}, v_o, i_o, i_D, i_S)$.

٤- القيمة الفعالة للتوافقية الأولى لفولطية وتيار المخرج.

الحل:-

[illegible] المقطع [illegible] على التيار [illegible]

$$[illegible] = \frac{11}{[illegible]} = [illegible]$$

$$[illegible]\,25\times10^{[illegible]}\times\frac{[illegible]}{1\times10^{-3}} = 0.625$$

يتم تحديد قيمة $\left(\rho = \frac{t_{x\,on}}{T}\right)$ التي تمثل الحد الفاصل بين عمل المقطع بتيار متصل أو غير متصل من العلاقة:-

$$m = \frac{e^{\rho.\sigma}-1}{e^{\sigma}-1} = 0.1 = \frac{e^{0.625\rho}-1}{e^{0.625}-1} \Rightarrow \rho = \frac{t_{on}}{T} = 0.133$$

القيمة الحقيقة لـــ $\left(\frac{t_{on}}{T} = \frac{1}{2.5} = 0.4\right)$، وبما أن هذه القيمة أكبر من (ρ) فإن التيار يكون متصل. وبالتالي فإن:-

$$V_o = 0.4\times110 = 44V$$

$$I_o = \frac{V_o - V_C}{R} = \frac{44-11}{.25} = 132\;\;A$$

٢- قيمة التيار $(I_{max}\ ,\ I_{min})$.

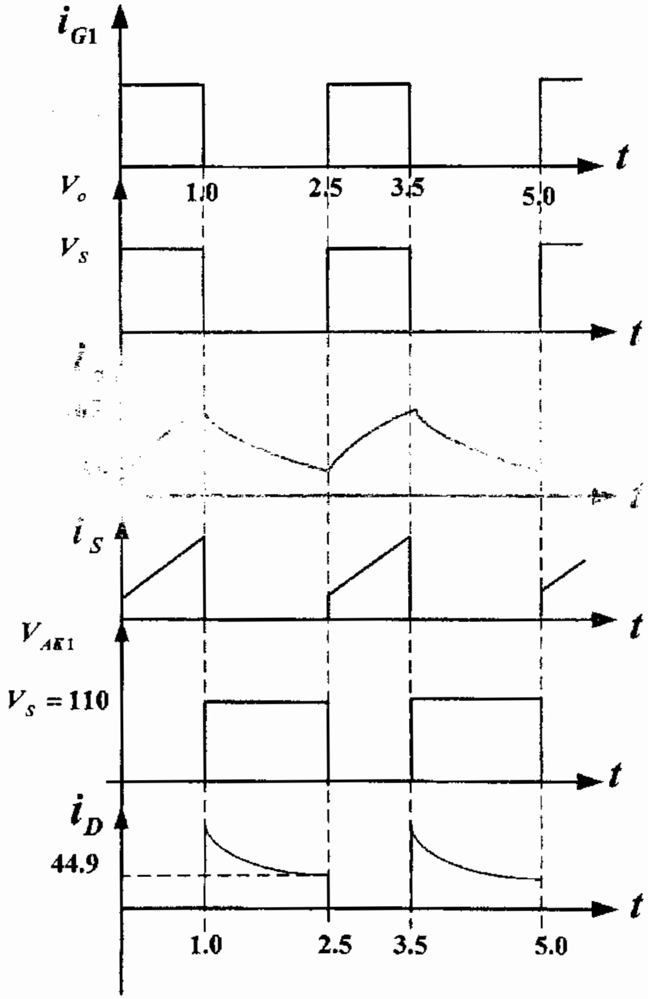
$$\frac{t_{on}}{\tau}=10^{-3}\,\frac{0.25}{10^{-3}}=0.25$$

$$\sigma=\frac{T}{\tau}=0.625$$

$$I_{max}=\frac{V_S}{R}\ \frac{\left[1-e^{-t_{ON}/\tau}\right]}{\left[1-e^{-T/\tau}\right]}-\frac{V_C}{R}\ =\frac{110}{0.25}\ \frac{\left[1-e^{-0.25}\right]}{\left[1-e^{-0.625}\right]}-\frac{11}{0.25}=165\ \ A$$

$$I_{min}=\frac{V_S}{R}\ \frac{\left(e^{t_{on}/\tau}-1\right)}{\left(e^{T/\tau}-1\right)}-\frac{V_C}{R}\ =\frac{110}{0.25}\ \frac{\left(e^{0.25}-1\right)}{\left(e^{0.625}-1\right)}-\frac{11}{0.25}=99.9\ \ A$$

٣-ويكون رسم المنحنيات لكل من $\left(i_{G1}, v_o, i_o, i_D, i_S\right)$ للمثال(٦-١) على الـشكل التالي:



٤- التردد الزاوي:-

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2.5\times10^{-3}} = 2513 \ \ rad/\text{sec}.$$

$$V_{1R} = \frac{C_1}{\sqrt{2}} = \frac{V_S}{\pi}\sqrt{1 - Cosn\,\omega\,t_{ON}}$$

$$= \frac{110}{\pi}\sqrt{\left(1 - Cos\frac{2513}{10^3}\right)} = 47.1 \ \ V$$

$$I_{1R} = \frac{V_{1R}}{Z_1} = \frac{V_{1R}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{74.1}{\sqrt{(0.25)^2 + \left(2513\times1\times10^{-3}\right)^2}} = 18.7 \ \ A$$

مثال (٦-٢):- لنفس المقطع المثال(٦-١) اذا كان:

$V_s = 110\,V$, $L = 0.2mH$, $R = 0.25\Omega$, $V_C = 40V$, $T = 2500\mu S$

$t_{ON} = 1250\mu S$

المطلوب حساب:-

٥- القيمة المتوسطة لتيار وفولطية المخرج.

٦- القيمة العظمى والصغرى للتيار $(I_{max}\ ,\ I_{min})$.

٧- رسم المنحنيات لكل من $(i_{G1}, v_o, i_o, i_D, i_S)$.

٨- القيمة الفعالة للتوافقية الأولى لفولطية وتيار المخرج.

الحل:-

١- لا بد من تحديد عمل المقطع ومعرفة هل التيار متصل أو غير متصل.

$$m = \frac{V_C}{V_S} = \frac{40}{110} = 0.364$$

$$\sigma = \frac{T}{\tau} = 0.25\times10^{-3}\times\frac{0.25}{0.2\times10^{-3}} = 3.125$$

يتم تحديد قيمة $\left(\rho = \frac{T_{x\,on}}{T}\right)$ التي تمثل الحد الفاصل بين عمل المقطع بتيار متصل أو غير متصل من العلاقة:-

$$m = \frac{e^{\rho.\sigma} - 1}{e^{\sigma} - 1} = 0.364 = \frac{e^{3.125\rho} - 1}{e^{3.125} - 1} \Rightarrow \rho = \frac{t_{on}}{T} = 0.7$$

القيمة الفعلية لـــ $\left(\frac{T_{ON}}{T} = 0.5\right)$، وبما أن هذه القيمة أقل من (ρ) فإن التيار يكون غير متصل. وبالتالي فإن:-

$$\tau = \frac{0.2 \times 10^{-3}}{0.25} = 0.8 \times 10^{-3}\ Sec.$$

$$\frac{t_{ON}}{\tau} = \frac{1.25 \times 10^{-3}}{0.8 \times 10^{-3}} = 1.56$$

$$t_x = 0.8 \times 10^{-3} \ln\left\{e^{1.56}\left[1 + \frac{110 - 40}{40}\left(1 - e^{-1.56}\right)\right]\right\}$$

$$= 1.94 \times 10^{-3}\,Sec.$$

$$V_o = \frac{t_{ON}}{T}V + \frac{(T - t_{ON})}{T}V_C$$

$$V_o = 0.5 \times 110 + \frac{(2.5 - 1.94) \times 10^{-3}}{2.5 \times 10^{-3}} \times 40 = 64\ V$$

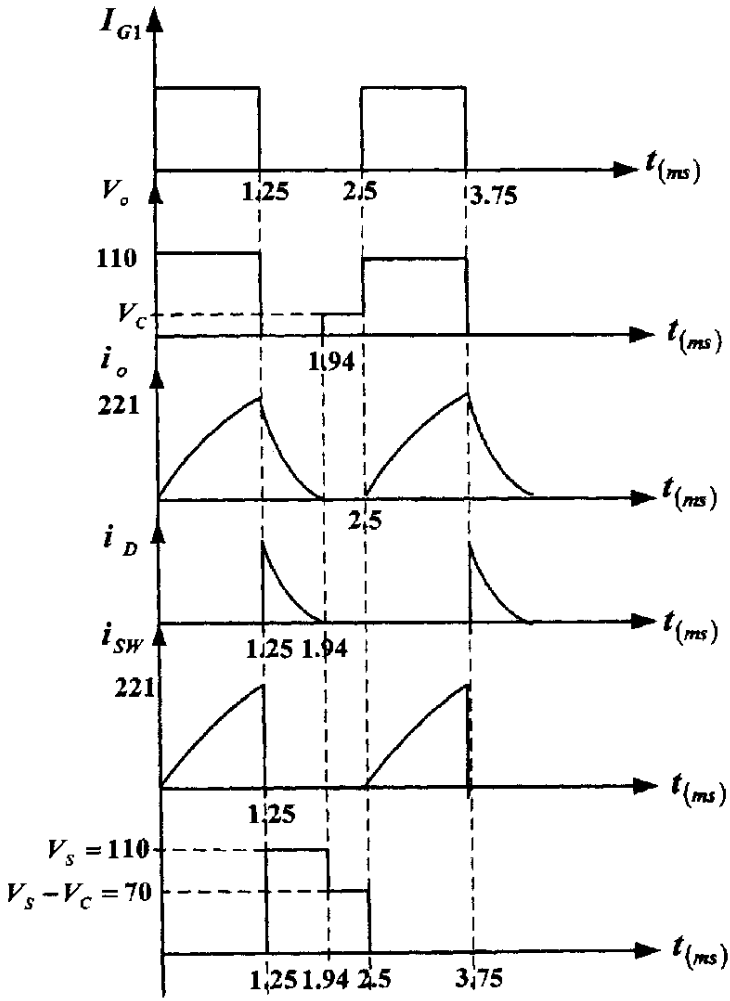
$$I_o = \frac{V_o - V_C}{R} = \frac{64 - 40}{0.25} = 96\ A$$

٢- حيث أن التيار غير متصل فإن:- $I_{\min} = 0$

$$I_{\max} = \frac{V_S - V_C}{R}\left[1 - e^{-t_{ON}/\tau}\right]$$

$$= \frac{110 - 40}{0.25}\left[1 - e^{-1.56}\right] = 221\ A$$

٣-ويكون رسم المنحنيات لكل من $(i_{G1}, v_o, i_o, i_D, i_S)$ للمثال(٦-٢) على الـــشكل التالي:



٤- التردد الزاوي:-

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2.5\times10^{-3}} = 2513 \ \ rad/\sec.$$

$$a_n = \frac{V_S}{n\pi}\left[1 - Cos\, n\,\omega\, t_{ON}\right] - \frac{V_C}{n\pi}\left[1 - Cos\, n\,\omega\, t_x\right]$$

$$a_1 = \frac{110}{\pi}\left[1 - Cos\left(2.513\times1.25\right)\right] - \frac{40}{\pi}\left[1 - Cos\left(2.513\times1.94\right)\right] = 59.3\ V$$

$$b_n = \frac{V_S}{n\pi}\left(Sin\, n\,\omega\, t_{ON}\right) - \frac{V_C}{n\pi}\left(Sin\, n\,\omega\, t_{on}\right)$$

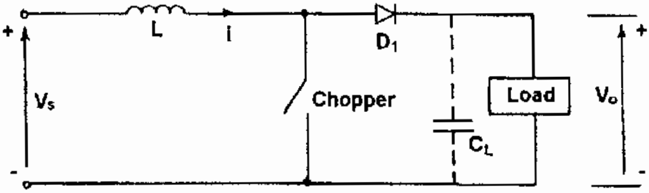
$$b_1 = \frac{110}{\pi}\left(Sin\left(2.513\times1.25\right)\right) - \frac{40}{\pi}\left(Sin\left(2.513\times1.94\right)\right) \cong -12.6\ V$$

$$V_{1R} = \frac{C_1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(59.3\right)^2 + \left(12.6\right)^2} = 42.9\ V$$

$$I_{1R} = \frac{V_{1R}}{Z_1} = \frac{V_{1R}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L\right)^2}} = \frac{42.9}{\sqrt{\left(0.25\right)^2 + \left(2.513\times0.2\right)^2}} = 76.4\ \ A$$

٦-٢- المقطع الرافع Principle of Step-Up Operation

يمكن استخدام المقطع من أجل رفع جهد المدخل، والشكل (٦-٤) يبين الدائرة المستخدمة لهذه الغاية.

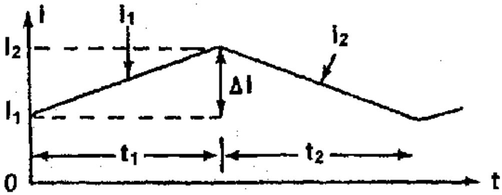


الشكل (٦-٤)

مقطع رافع للجهد

عندما يتم إغلاق (SW) لفترة زمنية (t_1)، فإن التيار في الملف يزداد وتخزن الطاقة في هذا الملف، إذا تم فصل المفتاح لفترة زمنية معينة (t_2) في هذه الحالة يتم تحويل القدرة المخزنة في الملف إلى الحمل عن طريق الديود (D_1) ويهبط التيار في الملف إلى قيمة صغيرة.

على فرض أن التيار يستمر بالمرور خلال الحمل، فإن شكل الموجة لتيار الملف مبينه بالشكل (٦-٥).



الشكل (٦-٥)

شكل الموجة لتيار الملف

عندما يكون المفتاح مغلق فإن الجهد على الملف يساوي:-

$$v_L = L\frac{di}{dt} \qquad (6.44)$$

تعطى القيمة العظمى لتغير التيار في الملف:-

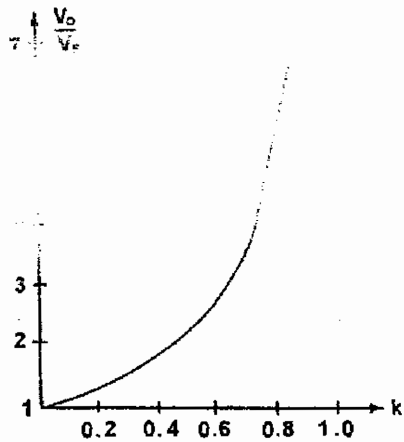
$$\Delta I = \frac{V_S}{L}t_1 \qquad (6.45)$$

جهد الحمل يكون:-

$$v_o = V_S + L\frac{\Delta I}{t_2} = V_S\left(1+\frac{t_1}{t_2}\right) = V_S\frac{1}{1-K} \qquad (6.46)$$

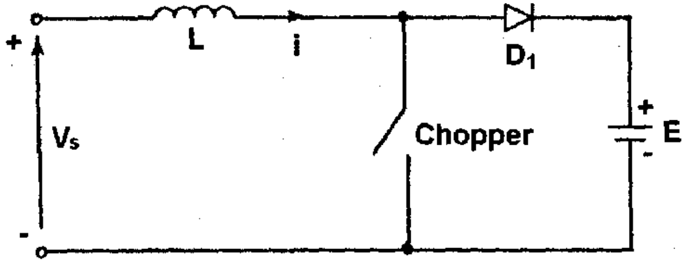
يتم الحصول على إستمرارية وصول الجهد إلى الحمل عن طريق وصل مكثف على طرفي الحمل (C_L)، وذلك حسب مبدأ عمل المكثف في عملية الشحن والتفريغ.

يمكن رفع الجهد على الحمل بتغير (K) (Duty Cycle)، وتكون القيمة الصغرى لجهد الحمل مساوية إلى (V_S) عندما $(K=0)$. ونلاحظ أن المقطع لا يمكن توصيله بشكل متصل بحيث تصبح $(K=1)$، ولكن من أجل قيم قريبة من الواحد $(K\approx 1)$، فإن جهد الخرج يصبح كبيراً ويعتمد بشكل أساسي على قيمة (K). والشكل (٦-٦) يبين علاقة $\left(\frac{V_o}{V_S}\right)$ مع (K). وهذا المبدأ من العمل يمكن تطبيقه من أجل نقل القدرة من مصدر تغذية إلى مصدر تغذية آخر كما هو مبين في الشكل (٦-٧).



الشكل (٦-٦)

علاقة $\left(\frac{V_o}{V_S}\right)$ مع (K)



الشكل (٦-٧)

نقل القدرة باستخدام مُقطع رفع

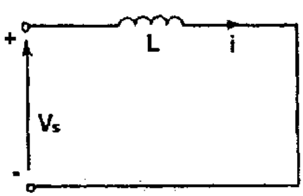
هنالك وضعان للمفتاح (SW):-

١- عندما يكون المفتاح (SW) مغلقاً كما هو مبين في الشكل (٦-٨-أ) يكون:-

$$V_S = L\frac{di_1}{dt}$$

$$i_1(t) = \frac{V_S}{L}t + I_1 \qquad (6.47)$$

حيث أن التيار (I_1) يمر في الدائرة عند إغلاق المفتاح (SW) الوضع الأول. وفي هذا الوضع يزداد التيار (I_1) ويكون الجهد $(V_S > 0)$ وتغير التيار $\left(\frac{di_1}{dt} > 0\right)$.



الشكل (٦-٨-أ-) الوضع الأول

٢- عندما يكون المفتاح (SW) مفتوحاً كما هو مبين في الشكل (٦-٨-ب) فإن:-

$$V_S = L\frac{di_2}{dt} + E$$

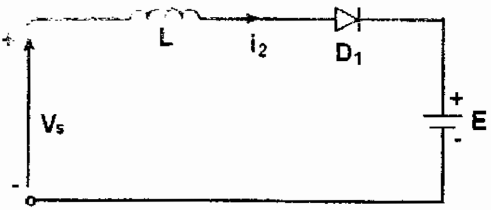
$$i_2(t) = \frac{V_S - E}{L}t + I_2 \qquad (6.48)$$

حيث أن (I_2) هو القيمة العظمى للتيار في الوضع الثاني. وفي هذه الحالة يهبط التيار عندما تكون قيمة $(V_S < E)$ و $\left(\frac{di_2}{dt} < 0\right)$.

إذا لم يحقق هذا الشرط فإن التيار (I_1) يستمر في الزيادة مؤديا إلى وضع غير مستقر. ويجب أن يكون $(0 < V_S < E)$، حيث يتم نقل القدرة من المصدر (V_s) إلى المصدر (E). والشكل (٦-٩) يبين تغير التيار مع الحمل.

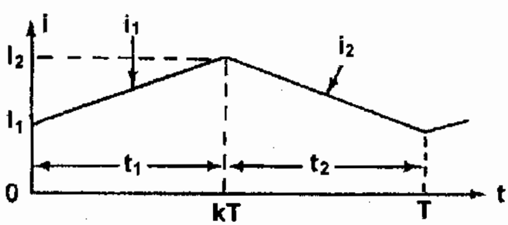
عند غلق المفتاح المقطع فإن الطاقة تنتقل من (V_s) [illegible]

الطاقة [illegible] في الملف تنتقل إلى البطارية (E)



mode 2

الشكل (٦-٨-ب-) الوضع الثاني



الشكل (٦-٩)

تغير التيار مع الحمل

محددات العمل:- عناصر الكترونيات القدرة المستخدمة في المقطعات يجب ان تتمتع بخواص تمكنها من تقليل زمن الوصل والفصل لهذه العناصر، وبالتالي فإن (K) يمكن التحكم فقط بين قيمتين قيمة دنيا وقيمة عليا (K_{min}, K_{max}). ومن هنا يتم تحديد قيمة جهد الخرج الأصغر وقيمة جهد الخرج الأعظم. وكذلك فإن تردد القطع للمقطع هو أيضا محدود، ويمكن ملاحظة ذلك من المعادلة:-

$$\Delta I_{max} = \frac{V_S}{4L.f} \qquad (6.49)$$

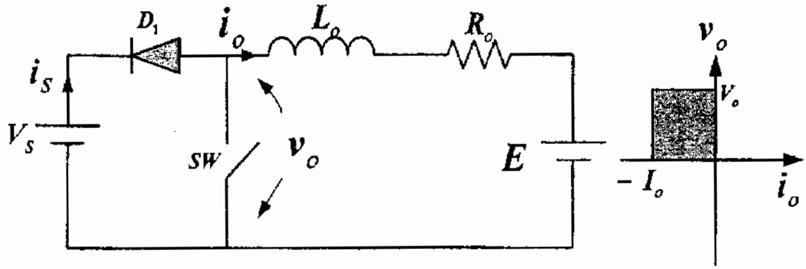
إن قيمة تيار التموج تعتمد بشكل عكسي على تردد المقطع، وبالتالي يجب أن يكون التردد مرتفعا بقدر الإمكان للتقليل من تيار التموج والتقليل من قيمة الملف الموصول على التوالي مع الدائرة.

٦-٢-١- المقطع الرافع من صنف (B) Class (B) Chopper

هذا المقطع هو من النوع الرافع للجهد ويعمل على إعادة القدرة الى مصدر الجهد المستخدم في حال كون مخرج هذا المقطع موصول مع محرك تيار مستمر. ومجال العمل في هذا النوع من المقطعات يكون ضمن الربع الثاني، حيث يكون الجهد الخارج موجباً بينما يكون التيار الخارج سالباً. والدائرة الكهربائية ومنطقة عمل المقطع موضحه في الشكل (٦-١١-أ-).

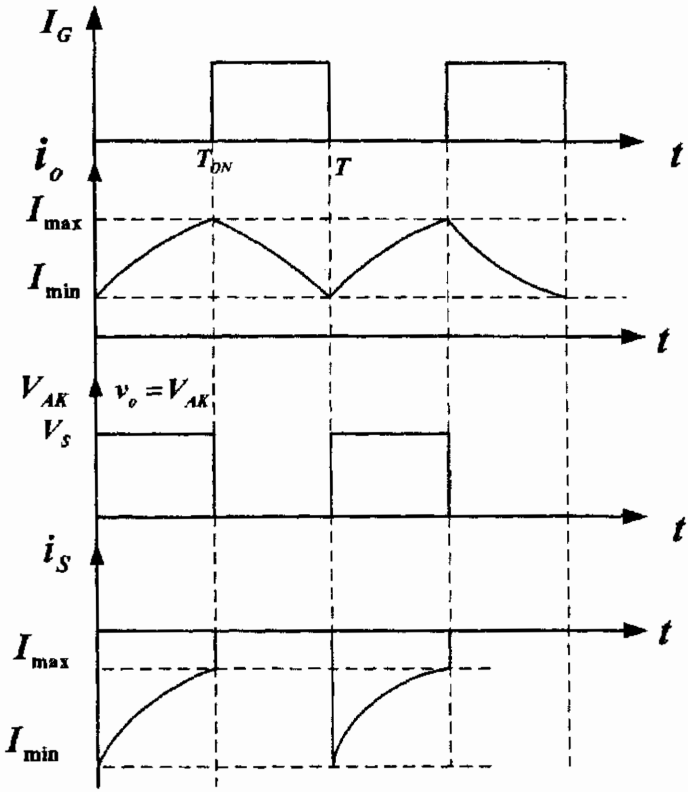
في هذا النوع من المقطعات يكون العمل بتيار غير متصل مستحيلاً. ويكون تحليل هذا النوع من المقطعات ضمن الحالة المستقرة للتيار المتصل فقط. إذا كان المفتاح (SW) في حالة قطع كامل وكانت قيمة $(V_S > E)$، في هذه الحالة يكون تيار المصدر (I_S) وتيار المخرج (I_o) يساويان الصفر. وتكون الدائرة غير عملية، لذلك لا بد من تشغيل المفتاح (SW) لفترة زمنية (t_{ON}) وفصل هذا المفتاح لفترة زمنية (t_{OFF}). في هذه الحالة يقوم المصدر (E) بتخزين قدرة في الملف

(L) عند توصيل المفتاح، وجزء من هذه الطاقة يعاد الى مصدر الجهد (V_S) عن طريق الديود (D_1) عند فصل المفتاح (SW).



الشكل (٦-١١-أ-)

الدائرة الكهربائية للمقطع الرافع من صنف (B)



الشكل (٦-١١-ب-)

شكل الموجات الخارجة للمقطع من نوع (B)

على فرض أن فترات التوصيل والقطع للمفتاح حسب ما هو مبين في الشكل (٦-١١-ب-)، فإنه يمكن تحليل الدائرة على النحو التالي:-

عند الزمن $(t = 0)$، فإن قيمة التيار المار من خلال الحمل يكون في الاتجاه السالب وذات قيمة (I_{min}). عندما يكون المفتاح مفتوحاً في الفترة $(t_{on} < t < T)$ فإن

الطاقة المخزنة في الملف تعود الى المصدر (V_S) عن طريق الديود (D_1) ويمكن وصف نقصان التيار (i_o) من خلال المعادلة:-

$$V_S = L\frac{di_o}{dt} + R.i_o + E \Rightarrow \frac{di_o}{dt} + \frac{R}{L}.i_o = \frac{V_S - E}{L} \qquad (6.50)$$

ويكون الحل العام للمعادلة من الشروط الابتدائية عندما $(i_o = I_{max})$.

$$i_o = \left(\frac{V_S - E}{R}\right)\left(1 - e^{-t/\tau}\right) + I_{min}.e^{-t/\tau} \qquad (6.51)$$

عند غلق المفتاح (SW) فإن الجهد (E) يمرر تيار في الملف (L)، وبالتالي يكون الجهد $(V_{AK} = v_o = 0)$ وعند اللحظة $(t = t_{ON})$ فإن قيمة التيار تصل الى القيمة العظمى (I_{max}). ويمكن وصف زيادة التيار (i_o) من خلال المعادلة:-

$$L\frac{di_o}{dt} + R.i_o + E = 0 \Rightarrow \frac{di_o}{dt} + \frac{R}{L}.i_o = -\frac{E}{L} \qquad (6.52)$$

ويكون الحل العام للمعادلة من الشروط الابتدائية [illegible]

$$i_o = -\frac{E}{R}\left(1 - e^{-t'/\tau}\right) + I_{max}.e^{-t'/\tau} \qquad (6.53)$$

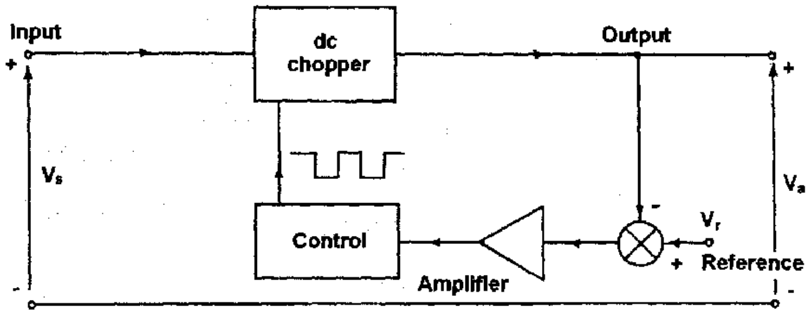
عند الزمن $(t = t_{on})$ فإن:-

$$i_o(t = t_{on}) = I_{max} \qquad (6.54)$$

٦-٣- استخدام المقطع كمنظم للجهد

Switching Mode Regulators

يمكن استخدام المقطع كمنظم للجهد حيث يقوم بتحويل جهد (dc) غير منظم إلى جهد (dc) منظم. ويعتمد مبدأ التحكم بعرض النبضة عند تردد ثابت (PWM)، وعناصر التحكم المستخدمة تكون (BJT , MOSFET). والمخطط الصندوقي للمنظم مبين في الشكل (٦-١١).

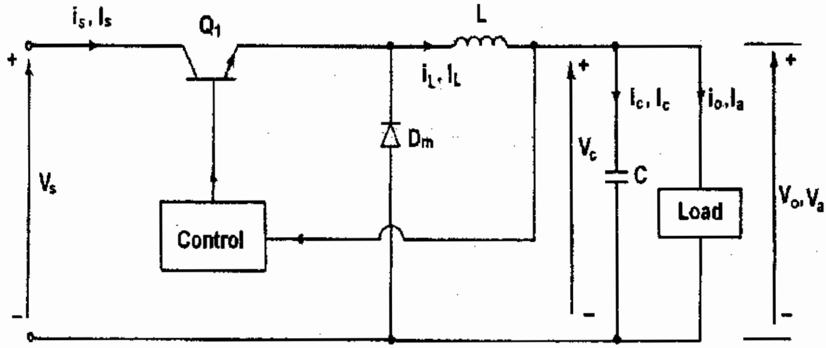


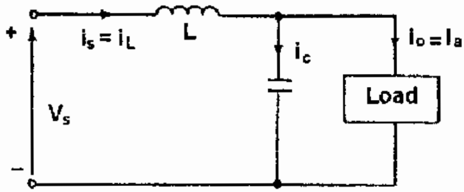
الشكل (٥-١١)
المخطط الصندوقي للمنظم

توجد هذه المنظمات بشكل واسع كـدوائر تكامليـة (Integrated Circuit). ويتم اختيار تردد المقطع باختيار قيمة (R,C) للمذبذب (Oscillator). وكمثال من أجل زيادة فعالية المنظم فإن القيمة الصغرى لفترة التذبذب يجب أن تكـون أكبـر بـ(100) ضعف من زمن الفصل للترانزستور. فمـثلا إذا كـان زمـن الفـصل للترانزستور مساويا $(0.5\mu S)$ فإن فترة التذبذب تكون مساوية $(50\mu S)$ والتـي تعطي أكبر تردد للمذبذب مساوياً $(20\,KHz)$. وهذا بدوره يُعزى الى المفاقيد فـي عملية الوصل والفصل في الترانزستور، حيث تزداد هذه المفاقيد مع تردد الفـصل وبالتالي تقل الفعالية. بالإضافة إلى ان المفاقيد في القلب المعدني للملفات تحد مـن أمكانية العمل في الترددات العالية.

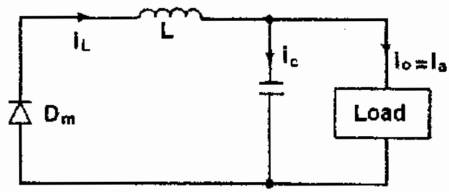
وهنالك أربعة أنواع رئيسية من المنظمات الترانزستورية هي:-

١- المنظم شائع الإستخدام (Buck regulators):- في هذا المنظم تكون القيمـة المتوسطة لجهد الخرج (V_a) أقل من جهد الدخل (V_S). والدائرة المكافئـة لهـذا المنظم وشكل الموجة الخارجة مبين في الشكل (٦-١٢). وهو نـوع مـن أنـواع المقطعات الخافضة للجهد، وعنصر التحكم هو ترانزستور (BJT).





Mode 1



Mode 2

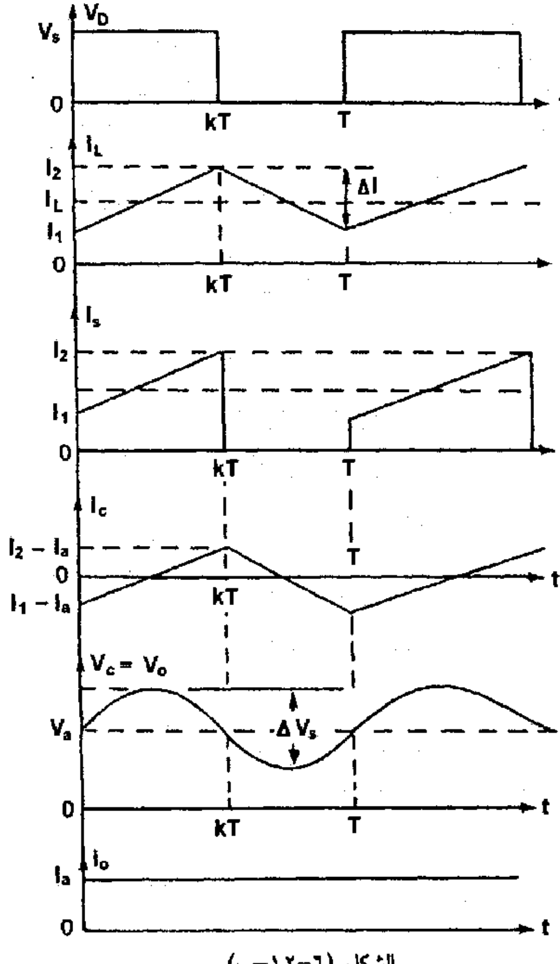
الشكل (٦-١٢-أ)

الدائرة المكافئة للمنظم

يمكن تصنيف عمل الدائرة إلى وضعين:-

الوضع الأول:-عندما يكون الترانزستور (Q_1) في وضع (ON) عند $(t = 0)$، فإن تيار المدخل سوف يزداد من قيمة (I_1) إلى قيمة (I_2) ويمر من خلال المرشح (LC) والحمل (R).

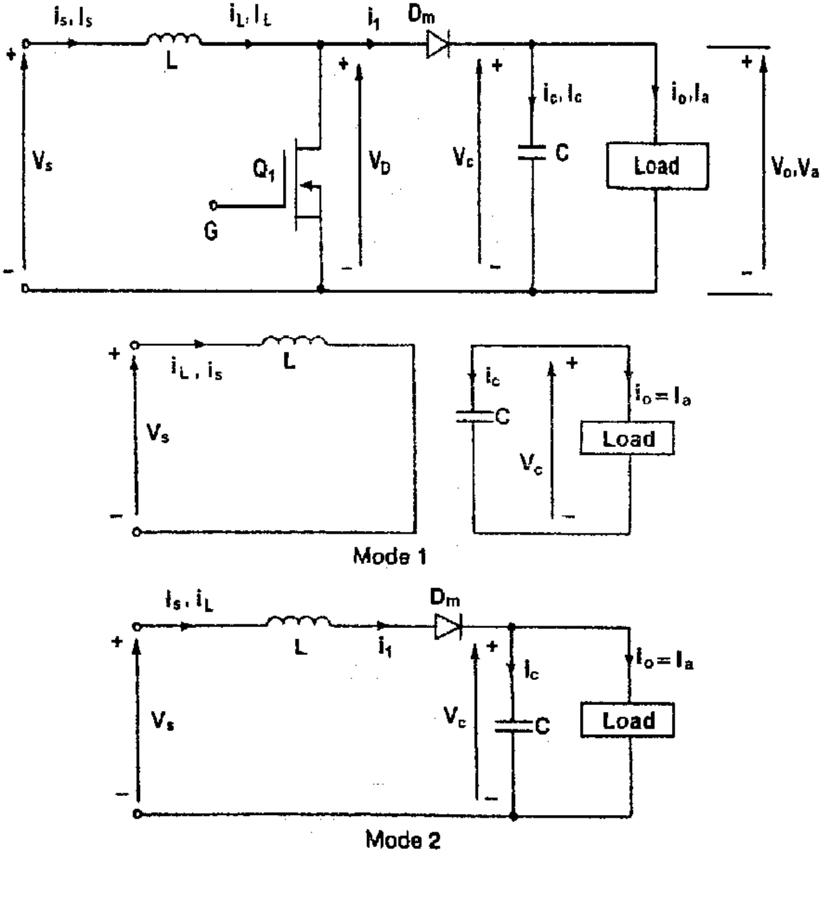
الوضع الثاني:- عندما يتم فصل الترانزستور (Q_1) عند $(t = t_1)$، فإن الديود (D_m) يقوم بتوصيل القدرة إلى الحمل نتيجة الطاقة المخزونة في الملف، ويستمر مرور تيار الملف حتى يقوم الترانزستور (Q_1) بالتوصيل مرة أخرى.



الشكل (٦-١٢-ب)

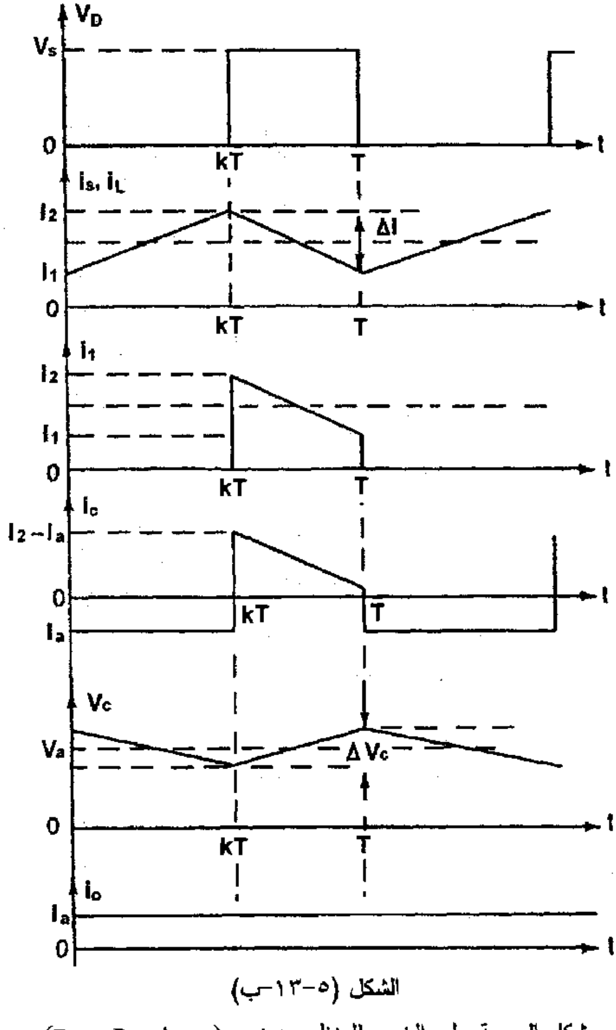
شكل الموجة الخارجة للمنظم من نوع (Buck Regulator)

٢- المنظم **(Boost Regulators)** :- يستخدم (MOSFET) ترانزستور في عملية الفصل والوصل وجهد الخرج له أكبر من جهد الدخل. والشكل (٥-١٣) يبين الدائرة لهذا المنظم وأوضاع العمل وشكل الموجة على الخرج.



الشكل (٥-١٣-أ)

الدائرة الكهربائية للمنظم (Boost Regulator) وأوضاع العمل



الشكل (٥-١٣-ب)

شكل الموجة على الخرج للمنظم من نوع (Boost Regulators)

مبدأ العمل:-

هذا المنظم يعمل كمقطع رافع للجهد (Step-up Chopper)، ويمكن تجزئة عمل هذا المنظم الى وضعين:-

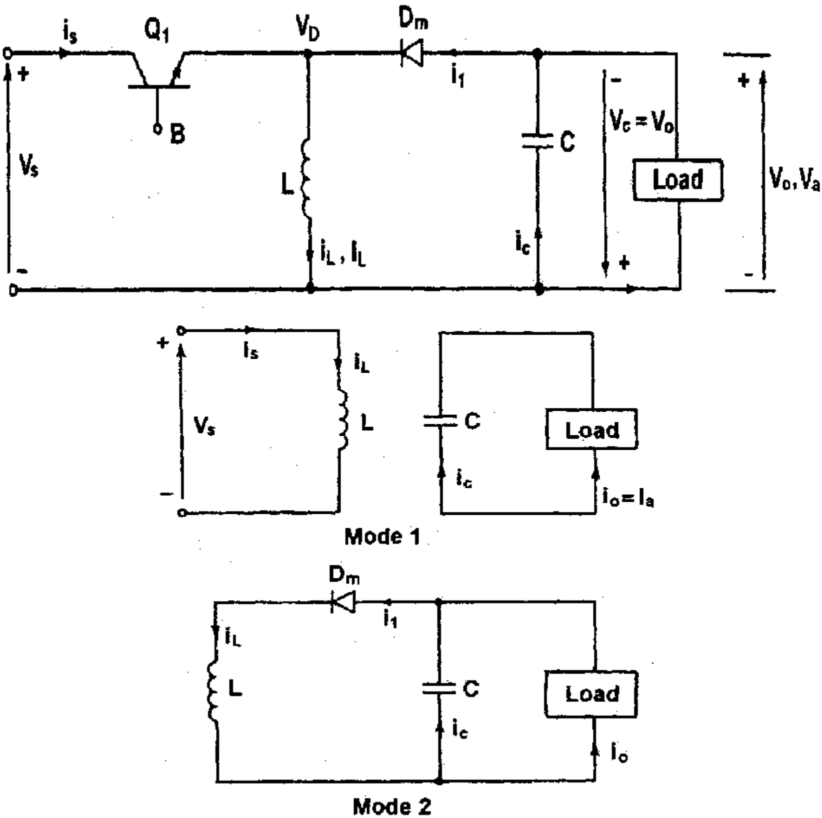
الوضع الأول:-عندما يكون الترانزستور (Q_1) في وضع التوصيل عند $(t=0)$ يبدأ التيار بالزيادة من (I_1) الى قيمة (I_2) ويمر بالملف والترانزستور.

الوضع الثاني:- عندما يقوم الترانزستور (Q_1) بالفصل عند $(t=t_1)$، فإن التيار في هذه الحالة يمر خلال الحمل عبر الملف والمكثف والديود (D_m). وتستمر القدرة بالوصول الى الحمل حتى يقوم الترانزستور (Q_1) بالوصل مرة آخرى خلال النصف الثاني للدورة.

وهذا النوع من المنظمات يمكن ان يقوم بتزويد الحمل بجهد أكبر من جهد الدخل بدون الحاجة الى محول. كونة يستخدم ترانزستور واحد فإن فعاليته عالية. ويكون تيار الدخل مستمراً، ويمر تيار مرتفع خلال عنصر القدرة (MOSFET). ويكون جهد الخرج حساسا للتغير في $(duty\ \ cycle\ \ (K))$، لذلك يكون من الصعب الحصول على الاستقرار في هذا المنظم.

كذلك فإن الترانزستور يوصل على التوازي، ويؤدي ذلك الى تكوين دائرة توازي للحمل مما يجعل من الصعب حماية الحمل في حالة وجود دائرة قصر. وتكون القيمة المتوسطة لتيار الحمل أقل من القيمة المتوسطة لتيار الملف. وتكون النسبة بين التيارين مساوية الى $(1-K)$، ويؤدي ذلك الى وجود قيمة فعالة مرتفعة تمر خلال المرشح المكون من المكثف. وهذا يؤدي الى إستخدام المرشحات ذات قيمة كبيرة للملف والمكثف وأكبر منها في حالة أستخدام (Buck Regulator).

٣- المنظم العاكس (Buck-Boost Regulators):- هذا النوع من المنظمات يعطي جهد خرج يمكن ان يكون أقل او أكبر من جهد المصدر. وتكون قطبية جهد الخرج معاكسة لجهد الدخل. ويدعى هذا المنظم بالعاكس (Inverting) او (Flyback Regulator). والدائرة المكافئة وشكل موجة الخرج واوضاع العمل لهذة المنظمات مبينة في الشكل (٦-١٤).

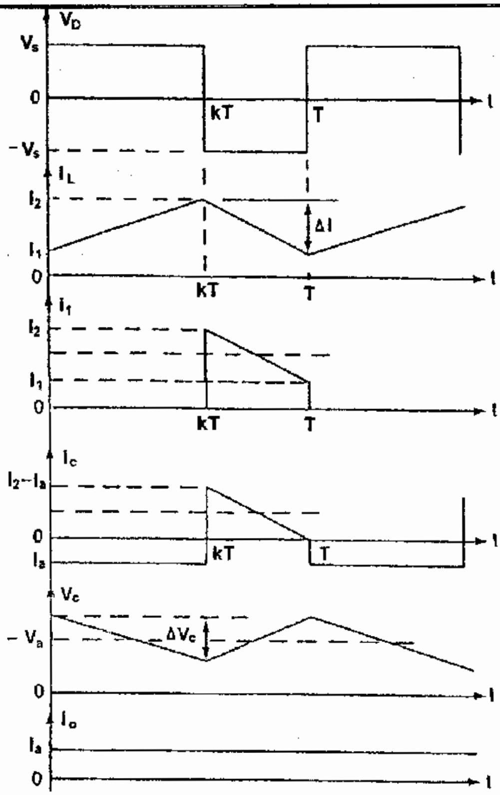


الشكل (٦-١٤-أ)

الدائرة المكافئة للمنظم العاكس واوضاع العمل

مبدأ عمل المنظم العاكس يقسم الى وضعين هما:-

الوضع الأول:- عندما يكون الترانزيستور في حالة التوصيل ويكون الديود (D_m) منحازاً انحيازاً عكسياً، وبالتالي فإن التيار يزداد ويمر خلال الملف (L) والترانزيستور.



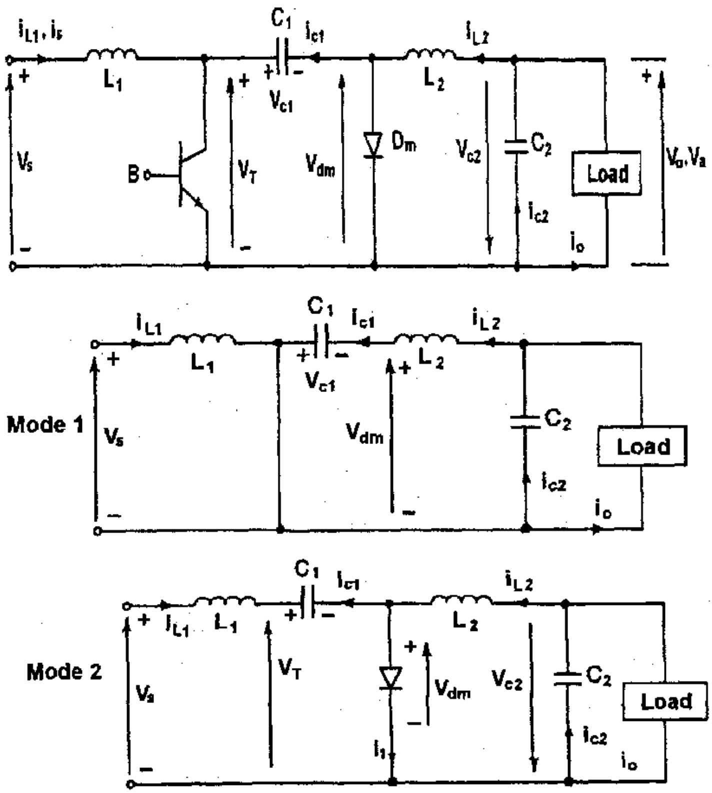
الشكل (٦-١٤-ب)

شكل موجة الخرج للمنظم العاكس

الوضع الثاني:-عندما يكون الترانزيستور في حالة الفصل، فإن الطاقة المختزنة في الملف تؤدي إلى مرور التيار خلال الملف والمكثف والديود (D_m) إلى الحمل ويتم إيصال الطاقة المختزنة في الملف إلى الحمل. ويستمر التيار بالتناقص حتى يقوم الترانزيستور (Q_1) بالتوصيل مرة أخرى.

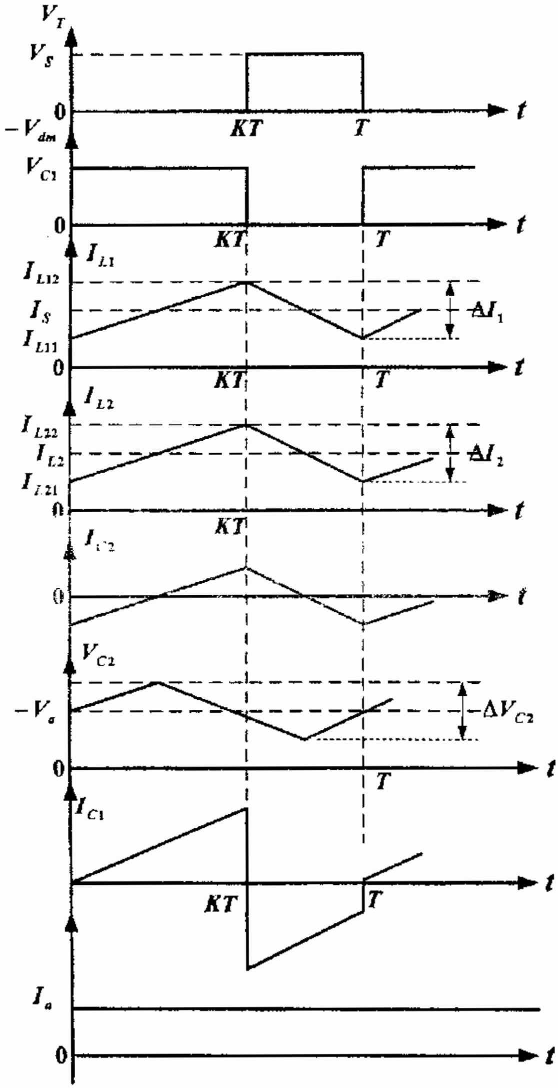
وهذا النوع من المنظمات يعطي جهد معكوس للحمل بدون الحاجة إلى محول. ويمتاز بفاعلية عالية، ويمكن حمايته من دوائر القصر بشكل بسيط.

٤- المنظم **(Cu'k Regulator)**:- هذا المنظم يستخدم ترانزيستور (BJT) كعنصر وصل وفصل ودائرته مشابهة لـدائرة (Buck-Boost-Regulator). ويعطـي هـذا المنظم جهد خرج يمكن أن يكون أقل أو أكبر من جهد الـدخل ومعـاكس لجهـد المدخل. ودائرة هذا المنظم وموجة الخرج وأوضاع العمل لهذا المنظم مبينة فـي الشكل (٦-١٥).



الشكل (٦-١٥-أ)

الدائرة الكهربائية للمنظم (Cu'k Regulator) واوضاع العمل



الشكل (٦-١٥-ب)

شكل الموجة الخارجة للمنظم من نوع (Cu'k Regulator)

أوضاع العمل للمنظم:- يمكن تقسيم أوضاع العمل للمنظم إلى وضعين كما يلي:-

الوضع الأول:- عندما يكون الترانزيستور (Q_1) في وضع (ON)، عند $(t = 0)$ ويزداد التيار خلال الملف (L_1) وبنفس الوقت يؤدي الجهد على المكثف (C_1) الى وجود انحياز عكسي على الديود (D_m) يعمل على عدم التوصيل من خلاله. ويقوم المكثف (C_1) بتفريغ شحنته في الدائرة المكونة من (C_1, C_2) والحمل والملف (L_2).

الوضع الثاني:- عندما يقوم الترانزيستور بالفصل عند $(t = t_1)$، فإن شحنة المكثف (C_1) من مصدر الجهد والشحنة المختزنة في الملف (L_2) تزود إلى الحمل. يتم تناوب عملية الفتح والغلق عن طريق الديود (D_m) والترانزستور (Q_1). وهذا النوع من المنظمات يعتمد على تحويل القدرة المخزنة في المكثف. ويمتاز بفاعليه كبيرة، وتكون الضياعات نتيجة الفصل والوصل فيه قليلة.

مميزات المنظمات السابقة:-

١- تحتوي هذه المنظمات على ترانزيستور واحد فقط.

٢- تقوم بعملية تحويل واحدة.

٣- تعتمد في نقل القدرة على الملفات والمكثفات.

٤- قدرة الخرج لها قليلة بحدود عشرة واط $(10\,Watt)$.

٥- من أجل التيارات العالية فإن قدرة العناصر المستخدمة تزداد مما يؤدي إلى الزيادة في الضياعات وتقليل الفعالية.

٦- لا يوجد عزل بين دائرة الدخل ودائرة الخرج.

٧- من أجل الحصول على قدرات أعلى يتم استخدام منظمات متعددة المراحل.

٦-٤- المقطعات التي تستخدم الثايروستورات

Chopper by Using Thyristor

تستخدم هذه الدوائر الثايروستورات ذات سرعات إطفاء عالية، ويستخدم مبدأ الإطفاء القسري لهذه الثايرستورات .

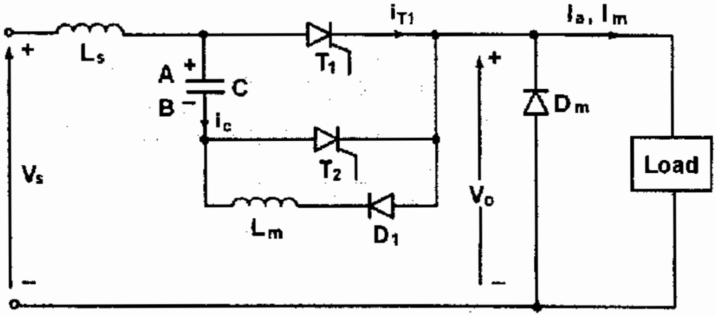
ولقد تم في الآونة الأخيرة تطوير عدد من هذه الدوائر، حيث تمتاز هذه الدوائر بعدة ميزات منها التقليل من زمن الوصل والعمل في مجال الترددات العالية، والاستقرار في العمل.

أهم أنواع هذه الدوائر هي:-

٦-٤-١- المقطعات ذات التبديل القسري باستخدام النبضات

Impulse-commutated Choppers

ويدعى بالمقطع الكلاسيكي (Classical Chopper) ، وهي دائرة شائعة الاستخدام وتتألف من ثايروستورين. عند بداية التشغيل يتم توصيل الثايروستور (T_2) وبالتالي شحن المكثف (C) والذي يمثل مصدر التغذية في البداية. والشكل (٦-١٦) يبين الدائرة الكهربائية لهذا النوع من المقطعات.

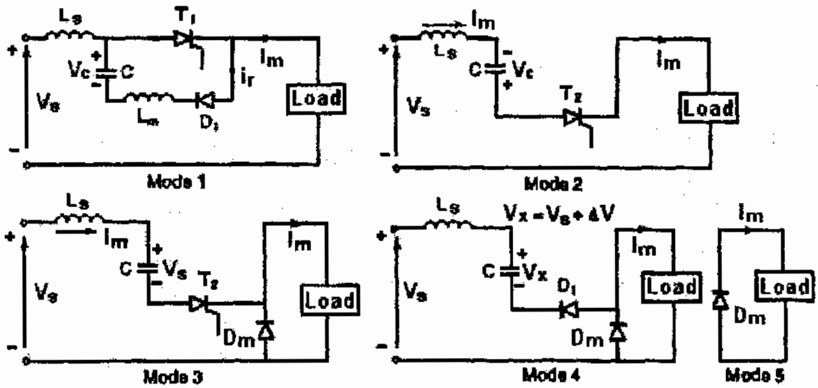


الشكل (٦-١٦)

الدائرة الكهربائية للمقطع ذات التبديل القسري

أوضاع التشغيل الموضحة في الشكل (٦-١٧)، وهي كما يلي:-

الوضع الأول:- عندما يوصل الثايروستور (T_1) يتم توصيل الحمل إلى مصدر التغذية. والمكثف المشحون (C) يقوم بتفريغ شحنته خلال كلٍ من (L_m, D_1, T_1).



الشكل (٦-١٧)

أوضاع العمل المختلفة

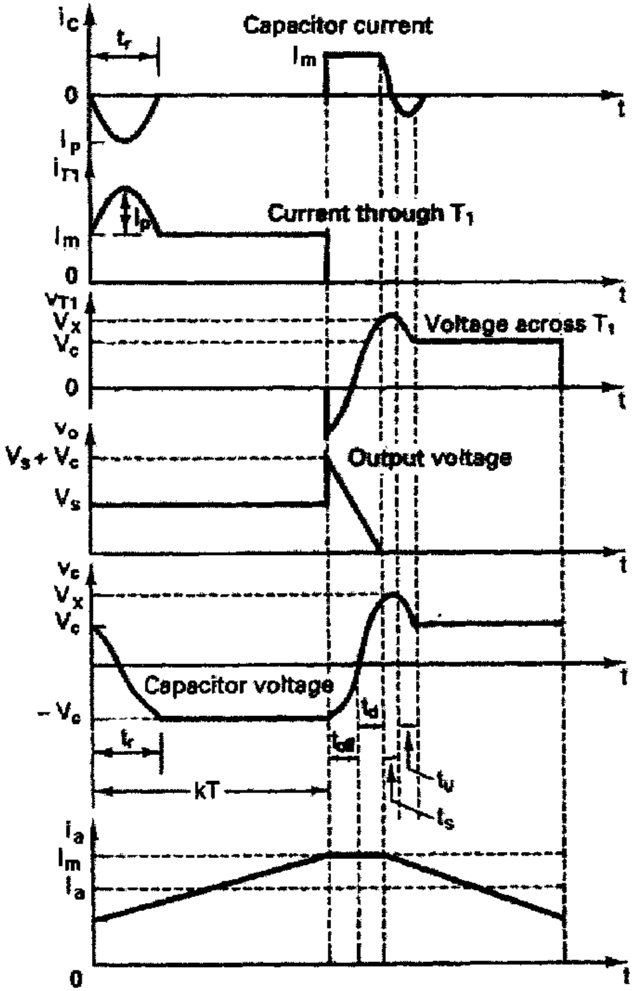
الوضع الثاني:- عندما يتم قدح الثايروستور (T_2). وفي هذه الحالة يطبق جهد انحياز عكسي (V_C) على الثايروستور (T_1) ويتم إطفاءه. يقوم المكثف بتفريغ شحنته خلال الحمل حتى تصل هذه الشحنة إلى الصفر بعد مضي زمن التفريغ.

الوضع الثالث:- عندما يبدأ الديود (D_m) بالتوصيل فإن تيار الحمل يتلاشى (يقترب من الصفر). والقدرة المختزنة في الملف (L_S) تفرغ في المكثف (C).

الوضع الرابع:- يبدأ هذا الوضع بالعمل عندما يتم شحن المكثف بشحنة كاملة ويستمر تيار الحمل بالتناقص. ومن المهم الملاحظة في هذا الوضع أنه يظهر نتيجةً وجود الديود (D_1) لأنه يسمح للتردد النبضي بالاستمرار في هذه الدائرة والمكونة من (D_m, D_1, C)ومصدر الجهد.

الوضع الخامس:- يبدأ هذا الوضع بالعمل عندما تكتمل عملية التبديل ويستمر تيار الحمل بالتلاشي خلال الديود (D_m)، وينتهي هذا الوضع عندما يتم توصيل الثايروستور (T_1) مع بداية موجة جديدة.

والشكل (٦-١٨) يبين أشكال الموجات للجهود والتيارات للعناصر المختلفة المؤلفة لهذا المقطع.



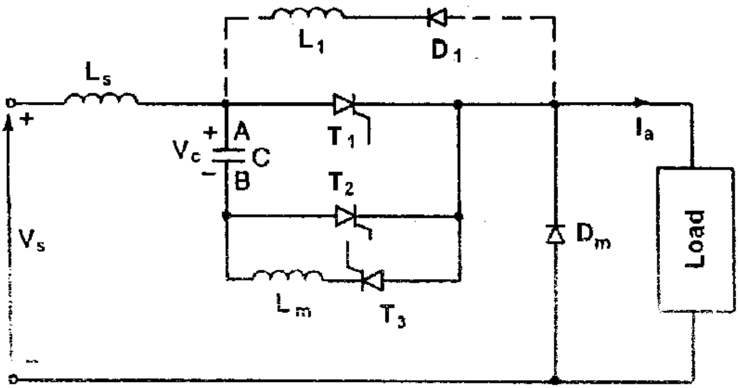
الشكل (٦-١٨)

شكل الموجات والجهود والتيارات للمقطع الثايرستوري

٦-٤-٢- المقطع النبضي المؤلف من ثلاثة ثايرستورات

Impulse-Commutated Three-Thyristor Chopper

المقطع السابق يعاني من مشكلة التخلص من الشحنة على المكثف، ويمكن التغلب على هذه الحالة باستخدام ثايروستور (T_3) بدلاً من الـديود (D_1). ويبين الشكل (٦-١٩) الدائرة المحسنة لهذا النوع من المقطعات.



الشكل (٦-١٩)

المقطع النبضي بثلاث ثايرستورات

أما أوضاع العمل لهذا المقطع والمبينة في الشكل (٦-٢٠) فهي كما يلي:-

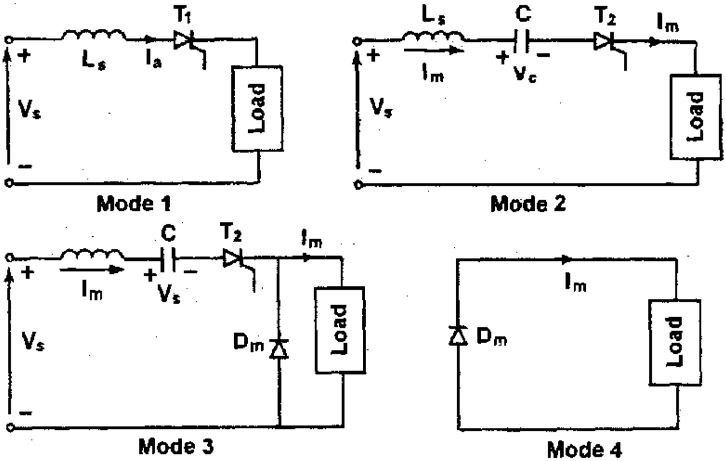
الوضع الأول:- يبدأ هذا الوضع عندما يكون الثايروستور الرئيسي (T_1) مقـدوحاً في هذه الحالة يتم وصل الحمل مع مصدر التغذية.

الوضع الثاني:- يبدأ هذا الوضع عندما يكون الثايروستور (T_2) مقـدوحاً ويقـوم المكثف (C) بتفريغ شحنته عبر الحمل.

الوضع الثالث:- يبدأ هذا الوضع عندما يعاد شحن المكثف من خلال مصدر التغذية ويبدأ الديود (D_m) بالتوصيل. خلال هذا الوضع يكون على المكثف شحنة زائـدة

نتيجة الطاقة المخزنة في الملف. ويتلاشى تيار الحمل من خــلال الـديود (D_m) وينتهي هذا الوضع عندما يصل تيار الشحن إلى الصفر.

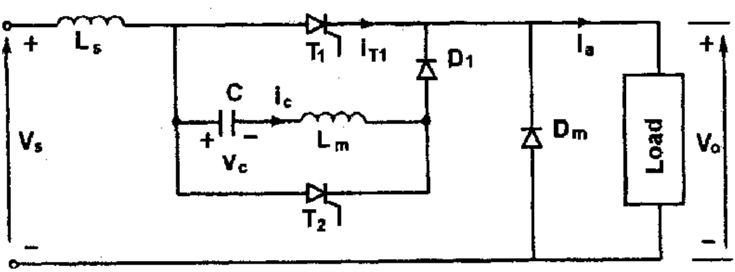
الوضع الرابع:- يبدأ هذا الوضع عندما يتوقف الثايروستور (T_2) عن التوصـيل ويستمر الديود (D_m) ويستمر تيار الحمل بالتناقص أو التلاشي.



الشكل (٦-٢٠)

أوضاع عمل المقطع النبضي المؤلف من ثلاثة ثايرستورات

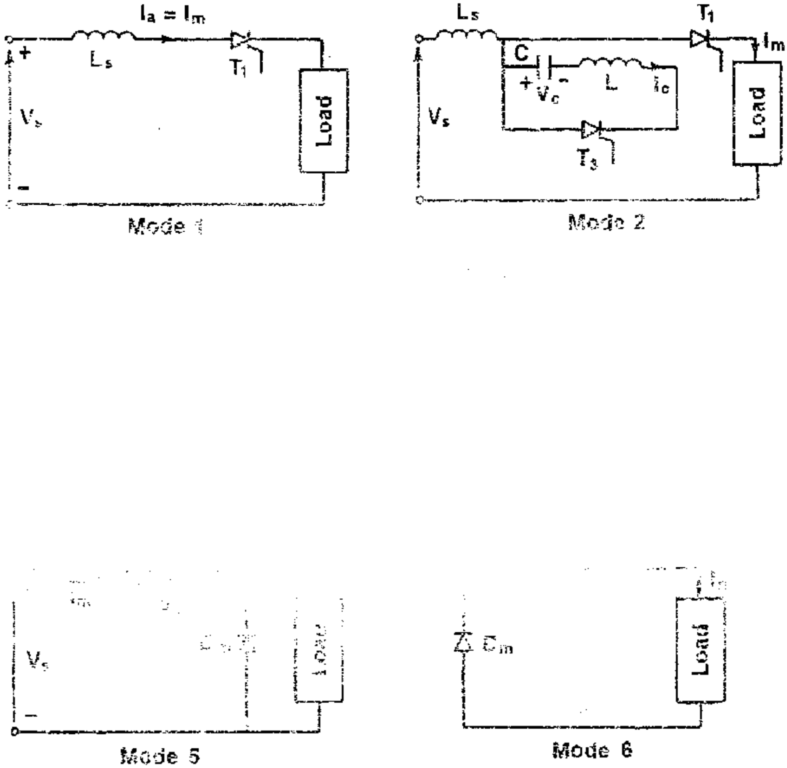
٦-٤-٣- المقطع ذو النبضة المرجعية Resonant Pulse Chopper



الشكل (٦-٢١)

المقطع ذو النبضة المرجعية

يمثل الشكل (٦-٢١) المقطع ذو النبضة المرجعية، أما أوضاع العمل لهذا المقطع فهي مبينة في الشكل (٦-٢٢) وهي كما يلي:-



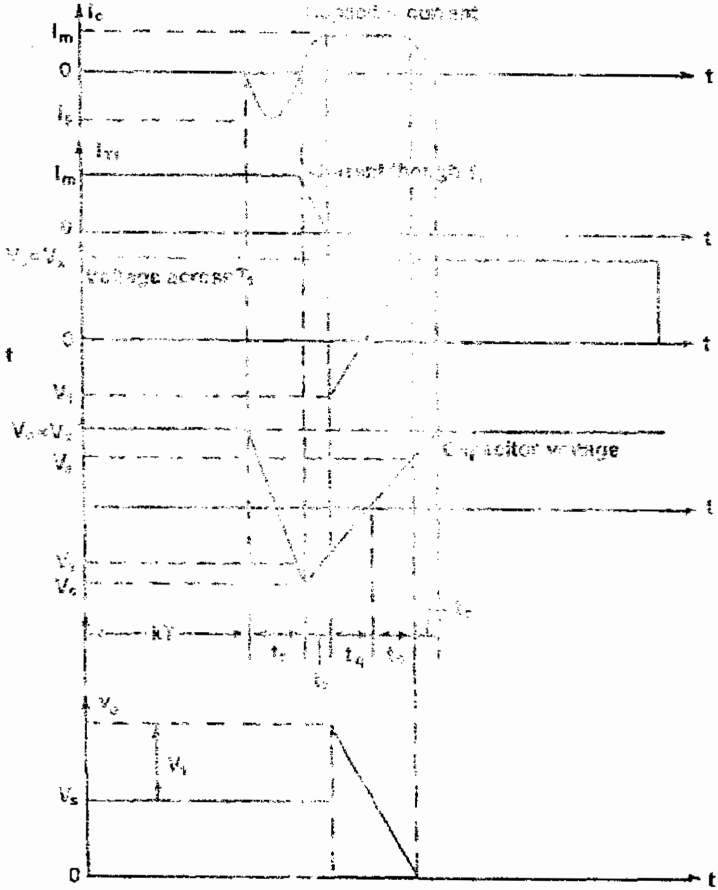
الشكل (٦-٢٢)

أوضاع العمل للمقطع ذو النبضة المرجعية

الوضع الأول:- يبدأ هذا الوضع عندما يقدح الثايروستور (T_1) ويتم وصل مصدر التغذية الى الحمل.

الوضع الثاني:- يبدأ هذا الوضع عندما يكون الثايروستور (T_2) مقدوحاً ويقوم المكثف بتفريغ شحنته في الملف والثايروستور (T_2).

الوضع الثالث:- يبدأ هذا الوضع [illegible] الثايروستور (T_2) ذاتياً ويقـوم المكثف بتفريغ شحنته خلال الدايود (D_1) و (T_1)، وينتهي عمل هذا الوضع عندما يصل التيار إلى القيمة العظمى (I_m).



الشكل (٦-٢٣)

شكل الموجة للجهد والتيار للمقطع ذو النبضة المرجعية

الوضع الرابع:- يبدأ هذا الوضع عندما يصبح التيار المار من خلال الثايروستور (T_1) مساوياً الى الصفر.

الوضع الخامس:- يبدأ هذا الوضع عندما يبدأ الديود (D_m) بالتوصيل ويتلاشى تيار الحمل خلال الديود (D_m) ويتم تخزين القدرة في الملف (L_S, L_m).

الوضع السادس:- يبدأ هذا الوضع عندما يتم تخزين القدرة في الملفات و يتوقف الديود (D_1) عن التوصيل ويستمر التيار في الحمل بالتلاشي حتى قدح الثايروستور (T_1) في النبضة التالية.

الشكل (٦-٢٣) يبين شكل موجة الجهد والتيار لهذا المقطع.

٦-٤-٤- تصميم دوائر المقطعات الثايروستورية

Chopper Circuit Design

من أهم المتطلبات التي يجب تحقيقها في هذه المقطعات هي تصميم دوائر التبديل، بحيث تؤمن زمن فصل مناسب للثايروستورات المستخدمة. و هذا الزمن يعتمد على الجهد المخزن في المكثف (C). يعتمد الجهد المطبق على العناصر بشكل أساسي على المكثفات وتيار الحمل.

من الأمور التي تؤخذ بعين الاعتبار عند تصميم المقطعات، كما يلي:-

١- تحديد طريقة العمل للمقطع.

٢- حساب محددات الدائرة المكافئة لكل وضع .

٣- تحديد التيار والجهد لكل وضع وكذلك شكل الموجة.

٤- حساب قيم العناصر للملفات والمكثفات لتحقيق متطلبات الحمل.

٥- تحديد قيم التيارات والجهود المناسبة لجميع العناصر المستخدمة .

٦- يتم التخلص من التوافقيات باستخدام دوائر المرشحات المناسبة.

العناصر الأساسية في تصميم المقطعات تتلخص في تردد القطع وحجم الملفات المستخدمة والمفاقيد نتيجة عمليات الفصل والوصل.

ملخص :-

مقطعات الجهد يمكن إستخدامها كمحول تيار مباشر رافع للجهد أو خافض للجهد، ويمكن استخدامه في وضع الفصل والوصل كمنظم للجهد وكذلك كمحـــول قدرة بين مصدرين للجهد. ونتيجة لاستخدام المقطع فإن ذلك يــؤدي إلـــى توليـــد توافقيات في دائرة الدخل والخرج. ويتم التخلص من هـــذه التوافقيـــات باســـتخدام الفلاتر في دوائر الدخل والخرج.

يستخدم في العادة مقطعات بترددات ثابتة لان تصميم الفلاتـــر للمقطعـــات بتـــردد صغير هي عملية صعبة ومعقدة.

من أجل تقليل حجم الفلاتر وتقليل عامل التموج للتيار فإن تردد القطع يجب أن يكون مرتفعاً.

إن المقطعات الثايروستورية تحتاج إلى دوائر إضافية من أجل تأمين عملية التبديل القسري لهذه الثايروستورات .

٦-٥- التحكم بسرعة محرك تيار مباشر تهـــيج مـــستقل باســـتخدام المقطـــع الثايرستوري.

Chopper-fed Separately Excited DC motor

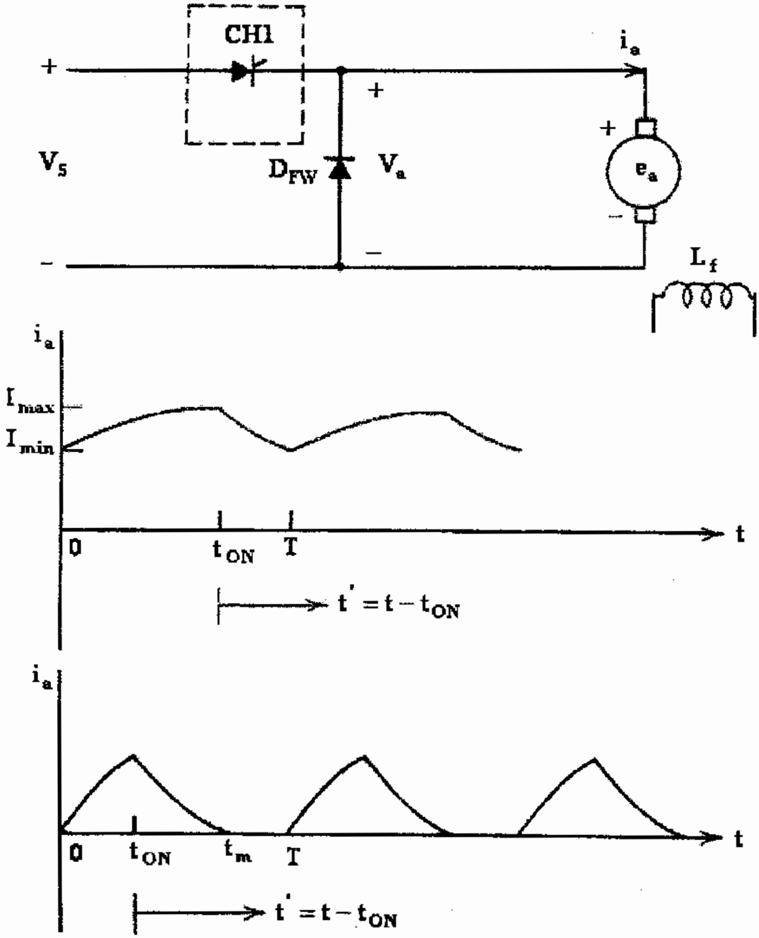
يبين الشكل (٦-٢٤) دارة محرك تيار مباشر تهيج مستقل يتغذى من مقطع والقيم اللحظية لتيار المنتج المتصل وغير المتصل. باعتبار أن تيار المنتج متصل وسرعة المحرك ثابتة نكتب العلاقات الرياضية التي تصف نظام عمل المحرك كما يلي:

١- عندما يكون المقطع في حالة توصيل خلال الفترة $(0 < t < t_{ON})$.

$$V_S = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K\phi\,\omega \qquad (6.55)$$

٢- عندما يكون المقطع في حالة فصل خلال الفترة $\left(t_{ON} < t < T\right)$.

$$0 = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K\phi\,\omega \qquad (6.56)$$



الشكل (٦-٢٤) دارة محرك تيار مباشر تهيج مستقل يتغذى من مقطع والقيم اللحظية لتيار المنتج المتصل وغير المتصل

تكون للتيار في الحالة المستقرة قيمة صغرى في لحظة توصيل المقطع $\left(i_a(0)=I_{min}\right)$، وقيمة عظمى في لحظة فصل المقطع $\left(i_a(t_{ON})=I_{max}\right)$ كما في الشكل (٦-٢٤)، نكتب علاقة القيمة اللحظية لتيار المنتج:-

١- عندما يكون المقطع في حالة توصيل خلال الفترة $\left(0<t<t_{ON}\right)$.

$$i_a=\frac{V_S-K\phi\omega}{R_a}(1-e^{-t/\tau})+I_{min}e^{-t/\tau} \qquad (6.57)$$

٢ - عندما يكون المقطع في حالة فصل خلال الفترة $\left(t_{ON}<t<T\right)$

$$i_a=\frac{-K\phi\omega}{R_a}(1-e^{-t'/\tau})+I_{max}e^{-t'/\tau} \qquad (6.58)$$

حيث:

$$t'=t-t_{ON}\ ;$$
$$\tau=L_a/R_a$$

نجد من المعادلة (٦-٥٧) قيمة التيار العظمى كما يلي:-

$$I_{max}=i_a(t_{ON})=\frac{V_S-K\phi\omega}{R_a}(1-e^{-t_{ON}/\tau})+I_{min}e^{-t_{ON}/\tau} \qquad (6.59)$$

نجد من المعادلة (٦-٥٨) قيمة التيار الصغرى كما يلي:-

$$I_{min}=i_a(T)=i_a(t'=T-t_{ON})=$$
$$=\frac{-K\phi\omega}{R_a}(1-e^{-(T-t_{ON})/\tau})+I_{max}e^{-(T-t_{ON})/\tau} \qquad (6.60)$$

بحل المعادلتين (٦-٥٩) و (٦-٦٠) نجد:-

$$I_{min}=\frac{V_S}{R_a}\frac{(e^{t_{ON}/\tau}-1)}{(e^{T/\tau}-1)}-\frac{K\phi\omega}{R_a} \qquad (6.61)$$

$$I_{max}=\frac{V_S}{R_a}\frac{(1-e^{-t_{ON}/\tau})}{(1-e^{-T/\tau})}-\frac{K\phi\omega}{R_a} \qquad (6.62)$$

تكون قيمة التيار الصغرى في حالة التيار غير المتصل $(I_{min} = 0)$، كما يتبين من الشكل (٦-٢٤). وبذلك نكتب قيمة التيار العظمى في حالة التيار غير المتصل من المعادلة (٦-٥٩) كما يلي:-

$$I_{max} = \frac{V_S - K\phi\omega}{R_a}(1 - e^{-t_{ON}/\tau}) \qquad (6.63)$$

لإيجاد اللحظة الزمنية $(t = t_m)$ أو $(t' = t_m - t_{ON})$ ، التي عندها تكون قيمة التيار صفراً ، نعوض (٦-٢٧) في (٦-٢٣) فنحصل على :

$$0 = \frac{-K\phi\omega}{R_a}(1 - e^{-(t_m - t_{ON})/\tau}) + \frac{V_S - K\phi\omega}{R_a}(1 - e^{-t_{ON}/\tau})(e^{-(t_m - t_{ON})/\tau}) \quad (6-64)$$

بحل المعادلة (٦-٦٤) نحصل على:

$$t_m = \tau \ \ln\left\{e^{t_{ON}/\tau}\left[1 + \frac{V_S - K\phi\omega}{K\phi\omega}\left(1 - e^{t_{ON}/\tau}\right)\right]\right\} \qquad (6.65)$$

يمكن تحديد استمرارية التيار من المعادلة (٦-٢٩) كما يلي:-

يكون تيار المنتج متصلاً إذا كانت $(t_m = T)$ وغير متصل إذا كانت $(t_m < T)$. يتم حساب قيم تيار المنتج المتوسطة والفعالة وقيمة فولطية المنتج المتوسطة وذلك لدراسة خواص المحرك كما يلي :

قيمة تيار المنتج المتوسطة (Average Armature Current):-

$$I_a = \frac{1}{T}\left[\int_0^{t_{ON}} i_a\ (t)\,dt + \int_{t_{ON}}^{T} i_a\ (t)\,dt\right] \qquad (6.66)$$

بتعويض المعادلات (٦-٥٧) و (٦-٥٩) في المعادلة (٦-٦٦) وأخذ التكامل نجد:

$$I_a = \frac{1}{T}[I_1 t_{ON} + \tau(I_{min} - I_1)(1 - e^{-t_{ON}/\tau}) - I_2(t_m - t_{ON}) +$$
$$+ \tau(I_{max} + I_2)(1 - e^{-(t_m - t_{ON})/\tau})] \qquad (6.67)$$

حيث:

$$I_1 = \frac{V_S - K\phi\omega}{R_a};$$

$$I_2 = \frac{-K\phi\omega}{R_a}$$

قيمة تيار المنتج الفعالة (RMS Armature Current):

$$I_{aR} = \sqrt{\frac{1}{T}\left[\int_0^{t_{ON}} i_a^2(t)\,dt + \int_{t_{ON}}^{T} i_a^2(t)\,dt\right]} =$$

$$=\{\frac{1}{T}[I_1^2 t_{ON} + 2\tau I_1(I_{\min} - I_1)(1 - e^{-t_{ON}/\tau}) +$$

$$+\frac{\tau}{2}(I_{\min} - I_1)^2(1 - e^{-2t_{ON}/\tau}) + I_2^2(t_m - t_{ON}) -$$

$$-2\tau I_2(I_{\max} + I_2)(1 - e^{-(t_m - t_{ON})/\tau}) +$$

$$+\frac{\tau}{2}(I_{\max} + I_2)^2(1 - e^{-2(t_m - t_{ON})/\tau})]\}^{1/2} \qquad (6.68)$$

قيمة عزم المحرك المتوسطة (Average Motor Torque):-

$$T = K\phi I_{ar}^2 \qquad (6.69)$$

قيمة فولطية المنتج المتوسطة (Average Armature Voltage):-

١- لحالة التيار المتصل $(t_m = T)$:-

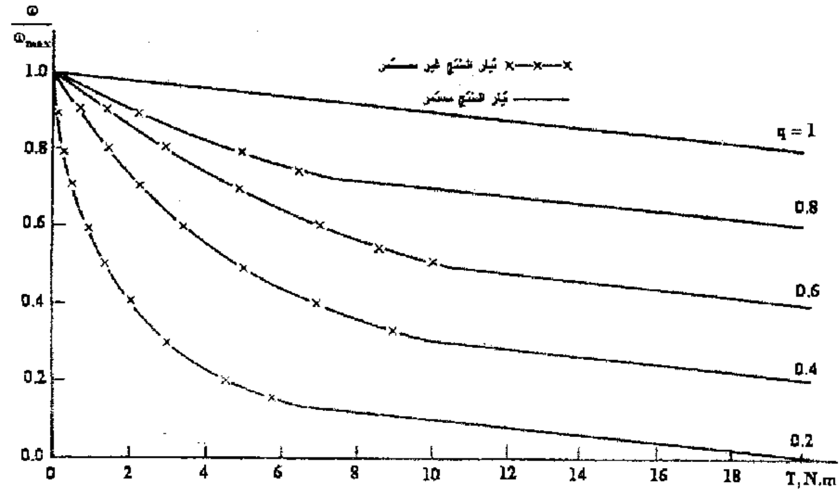
$$V_a = qV_S \qquad (6.70)$$

٢- لحالة التيار غير المتصل $(t_m < T)$:-

$$V_a = qV_S + K\phi\omega\frac{(T - t_m)}{T} \qquad (6.71)$$

يبين الشكل (٦-٢٥) الخاصية الميكانيكية لمحرك تيار مباشر تهيج مستقل يتغذى من مقطع عند قيم مختلفة لدورة عمل المقطع ولتردد تقطيع مقداره

$\left(f_{CH} = 120\,Hz\right)$. وتظهر على الخاصية الميكانيكية مناطق عمل المحرك في حالة تيار المنتج المتصل وفي حالة تيار المنتج غير المتصل.



الشكل (٦-٢٥)

الخاصية الميكانيكية لمحرك تيار مباشر تهيج مستقل يتغذى من مقطع عند قيم مختلفة لدورة عمل المقطع ولتردد تقطيع مقداره $\left(f_{CH} = 120\,Hz\right)$

٦-٦- التحكم في سرعة محرك تيار مباشر تهيج توالي باستخدام المقطعات الثايرستورية.

Chopper-fed Series DC motor

يبين الشكل (٦-٢٦) دارة محرك تيار مباشر تهيج توالي يتغذى من مقطع والقيم اللحظية لتيار المنتج المتصل وغير المتصل. باعتبار أن تيار المنتج متصلاً وسرعة المحرك ثابتة نكتب العلاقات الرياضية التي تصف نظام عمل المحرك كما يلي:-

١- عندما يكون المقطع في حالة توصيل خلال الفترة $\left(0<t<t_{ON}\right)$

$$V_S = L_{a\Sigma}\frac{di_a}{dt} + R_{a\Sigma}i_a + K_{af}i_a\,\omega + K_{res}\omega \qquad (6.72)$$

٢- عندما يكون المقطع في حالة فصل خلال الفترة $\left(t_{ON}<t<T\right)$.

$$0 = L_{a\Sigma}\frac{di_a}{dt} + R_{a\Sigma}i_a + K_{af}i_a\,\omega + K_{res}\omega \qquad (6.73)$$

تكون للتيار في الحالة المستقرة قيمة صغرى في لحظة توصيل المقطع $\left(i_a(0)=I_{min}\right)$ وقيمة عظمى في لحظة فصل المقطع $\left(i_a(t_{ON})=I_{max}\right)$ كما في الشكل (٦-٢٦) ،نكتب علاقة القيمة اللحظية لتيار المنتج:-

١- عندما يكون المقطع في حالة توصيل خلال الفترة $\left(0<t<t_{ON}\right)$.

$$i_a = \frac{V_S - K_{res}\omega}{R_a + K_{af}\omega}\left(1-e^{-t/\tau}\right) + I_{min}e^{-t/\tau} \qquad (6.74)$$

٢ - عندما يكون المقطع في حالة فصل خلال الفترة $\left(t_{ON}<t<T\right)$.

$$i_a = \frac{-K_{res}\omega}{R_a + K_{af}\omega}\left(1-e^{-t'/\tau}\right) + I_{max}e^{-t'/\tau} \qquad (6.75)$$

حيث :

$$t' = t - t_{ON}\ ;$$
$$\tau = L_a/(R_a + K_{af}\omega)$$

نجد من المعادلة (٦-٥٦) قيمة التيار العظمى كما يلي:-

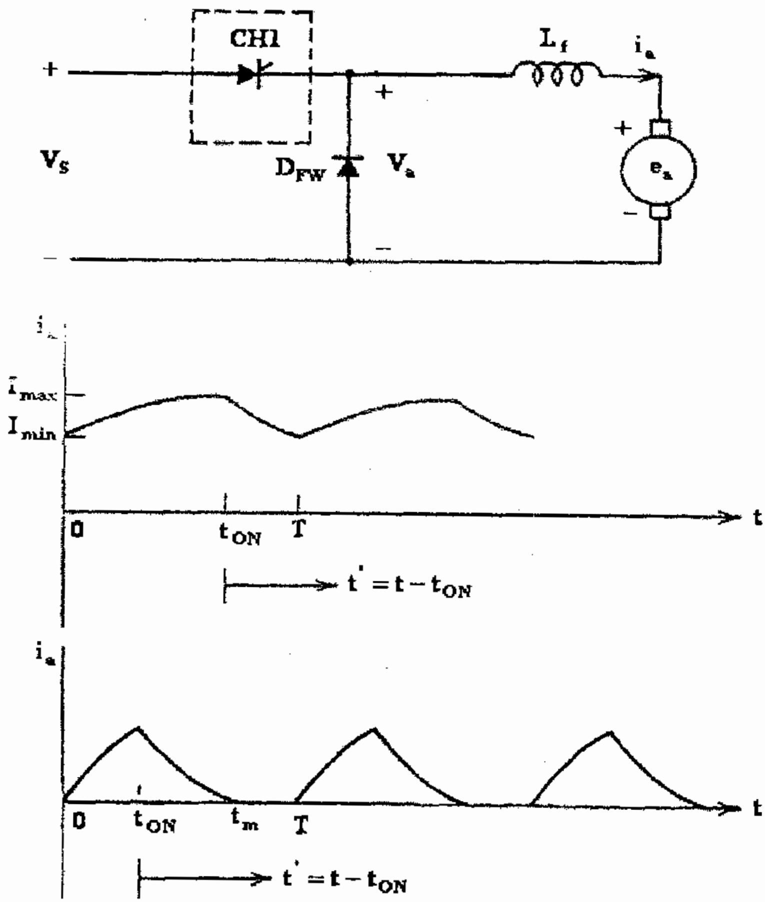
$$I_{max} = i_a(t_{ON}) = \frac{V_S - K_{res}\omega}{R_a + K_{af}\omega}\left(1-e^{-t_{ON}/\tau}\right) + I_{min}e^{-t_{ON}/\tau} \qquad (6.76)$$

نجد من المعادلة (٦-٥٧) قيمة التيار الصغرى كما يلي:-

$$I_{min} = i_a(T) = i_a(t' = T - t_{ON}) =$$
$$= \frac{-K_{res}\omega}{R_a + K_{af}\omega}\left(1-e^{-(T-t_{ON})/\tau}\right) + I_{max}e^{-(T-t_{ON})/\tau} \qquad (6.77)$$

بحل المعادلتين (٦-٧٦) و (٦-٧٧) نجد:-

$$I_{\min} = \frac{V_S}{R_a + K_{af}\omega} \frac{(e^{t_{ON}/\tau} - 1)}{(e^{T/\tau} - 1)} - \frac{K_{res}\omega}{R_a + K_{af}\omega} \tag{6.78}$$



الشكل (٦-٢٦) دارة محرك تيار مباشر تهيج توالي يتغذى من مقطع والقيم اللحظية لتيار المنتج المتصل وغير المتصل

$$I_{\max} = \frac{V_S}{R_a + K_{af}\omega}\frac{(1 - e^{-t_{ON}/\tau})}{(1 - e^{-T/\tau})} - \frac{K_{res}\omega}{R_a + K_{af}\omega} \qquad (6.79)$$

تكون قيمة التيار الصغرى في حالة التيار غير المتصل $(I_{\min} = 0)$، كما يتبين من الشكل (٦-٢٦) . وبذلك نكتب قيمة التيار العظمى في حالة التيار غير المتصل من المعادلة (٦-٧٦) كما يلي:

$$I_{\max} = \frac{V_S - K_{res}\omega}{R_a + K_{af}\omega}(1 - e^{-t_{ON}/\tau}) \qquad (6.80)$$

لإيجاد اللحظة الزمنية $(t = t_m)$ أو $(t' = t_m - t_{ON})$، التي عندها تكون قيمة التيار صفراً، نعوض (٦-٦١) في (٦-٧٥) فنحصل على:-

$$0 = \frac{-K_{res}\omega}{R_a + K_{af}\omega}(1 - e^{-(t_m - t_{ON})/\tau}) + \frac{V_S - K_{res}\omega}{R_a + K_{af}\omega}(1 - e^{-t_{ON}/\tau})(e^{-(t_m - t_{ON})/\tau}) \qquad (6.81)$$

بحل المعادلة (٦-٦٥) نحصل على:

$$t_m = \tau \ln\{e^{t_{ON}/\tau}[1 + \frac{V_S - K_{res}\omega}{K_{res}\omega}(1 - e^{-t_{ON}/\tau})]\} \qquad (6.82)$$

يمكن تحديد استمرارية التيار من المعادلة (٦-٨٢) كما يلي:-

يكون تيار المنتج متصلاً إذا كانت $(t_m = T)$، وغير متصل إذا كانت $(t_m < T)$. يتم حساب قيم تيار المنتج المتوسطة والفعالة وقيمة فولطية المنتج المتوسطة وذلك لدراسة خواص المحرك كما يلي:-

قيمة تيار المنتج المتوسطة (Average Armature Current):-

$$I_a = \frac{1}{T}\left[\int_0^{ton} i_a(t)\,dt + \int_{ton}^{T} i_a(t)\,dt\right] \qquad (6.83)$$

بتعويض المعادلات (٦-٥٦) و (٦-٥٧) في المعادلة (٦-٦٥) واخذ التكامل نجد:-

$$I_a = \frac{1}{T}[I_1 t_{ON} + \tau(I_{\min} - I_1)(1 - e^{-t_{ON}/\tau}) - I_2(t_m - t_{ON}) + \\ + \tau(I_{\max} + I_2)(1 - e^{-(t_m - t_{ON})/\tau})] \quad (6.84)$$

حيث:-

$$I_1 = \frac{V_S - K_{res}\omega}{R_a + K_{af}\omega};$$

$$I_2 = \frac{-K_{res}\omega}{R_a + K_{af}\omega}$$

قيمة تيار المنتج الفعالة (RMS Armature Current):-

$$I_{ar} = \sqrt{\frac{1}{T}\left[\int_0^{ton} i_a^2(t)\,dt + \int_{ton}^{T} i_a^2(t)\,dt\right]}$$

$$= \left\{\frac{1}{T}\left[\begin{array}{l} I_1^2 t_{ON} + 2\tau I_1(I_{\min} - I_1)(1 - e^{-t_{ON}/\tau}) \\ \quad + \frac{\tau}{2}(I_{\min} - I_1)^2(1 - e^{-2t_{ON}/\tau}) + I_2^2(t_m - t_{ON}) \\ \quad - 2\tau I_2(I_{\max} + I_2)(1 - e^{-(t_m - t_{ON})/\tau}) \\ \quad + \frac{\tau}{2}(I_{\max} + I_2)^2(1 - e^{-2(t_m - t_{ON})/\tau}) \end{array}\right]\right\}^{1/2} \quad (6.85)$$

قيمة عزم المحرك المتوسطة (Average Motor Torque):-

$$T = K_{af} I_{ar}^2 \quad (6.86)$$

قيمة فولطية المنتج المتوسطة (Average Armature Voltage):-

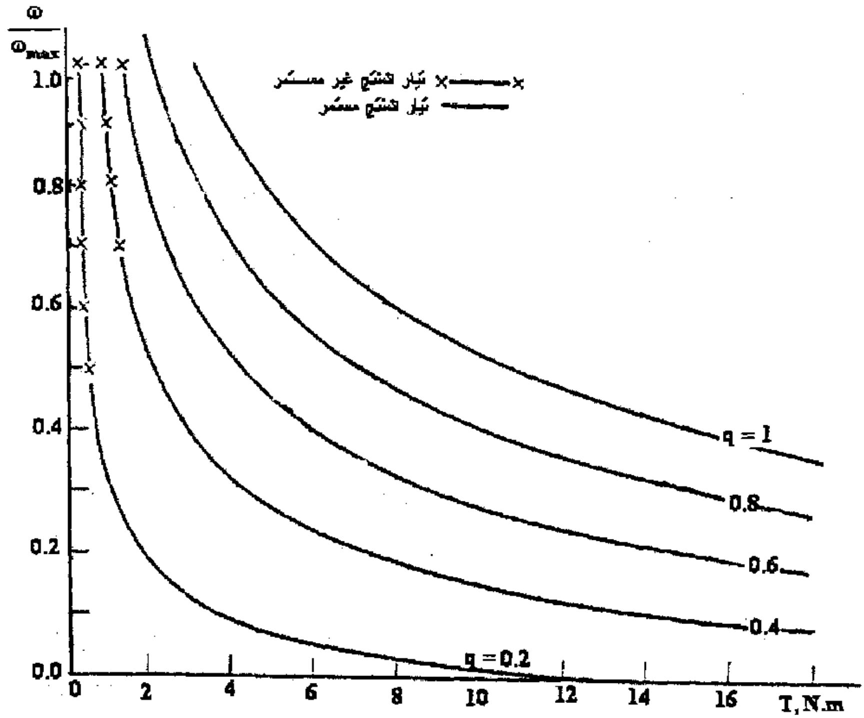
١- لحالة التيار المتصل $(t_m = T)$:-

$$V_a = qV_S \quad (6.87)$$

٢- لحالة التيار غير المتصل $(t_m < T)$:-

$$V_a = qV_S + K_{res}\omega\frac{(T - t_m)}{T} \qquad (6.88)$$

يبين الشكل (٦-٢٧) الخاصية الميكانيكية لمحرك تيار مباشر تهيج تـوالي يتغذى من مقطع عند قيم مختلفة لدورة عمل المقطـع ولتـردد تقطيـع مقـداره $(f_{CH} = 120\,Hz)$. وتظهر على الخاصية الميكانيكية مناطق عمل المحرك في حالة تيار المنتج المتصل وفي حالة تيار المنتج غير المتصل.



الشكل (٦-٢٧)

الخاصية الميكانيكية لمحرك تيار مباشر تهيج توالي يتغذى من مقطع عند قيم مختلفة لدورة عمل المقطع ولتردد تقطيع مقداره $(f_{CH} = 120\,Hz)$

الوحدة السابعة

[illegible]

الوحدة السابعة

العاكســـــات

Inverters

مقدمة:-

العاكسات هي محولات من جهد (dc) إلى جهد (ac). وآلية عمــل هــذه المحولات تقوم على أساس تحويل الجهد المستمر إلى الجهد المتناوب بقيمة معينــة وتردد معين. وجهد الخرج يمكن أن يكون ثابت أو متغير بتردد ثابــت أو بتــردد متغير. ولهذه العاكسات كسب يعرف بأنة عبارة عن نسبة جهد الخرج المتناوب إلى جهد الدخل المستمر. يمكن الحصول على جهد خرج متغير بتغيير قيمة جهد الدخل (dc) وتثبيت كسب العاكس.

[illegible] إذا تم تثبيت جهد [illegible]

فإنه في هذه الحالة يمكن الحصول على جهد [illegible]

بواسطة التغيير في عرض النبضة (PWM) للعاكس.

تكون موجة الخرج للعاكسات المثالية ذات شكل جيبي، ولكن في العاكسات العملية فإن شكل موجة الخرج لا يكون جيبيا ويحتوي على عدد من التوافقيات. من اجل التطبيقات ذات القدرات المنخفضة والمتوسطة فانه يتم الحصول على موجات مربعة (Square-Wave) وموجات شبة مربعة (Quasi-Square-Wave).

في التطبيقات ذات القدرات المرتفعة يتم الحصول على موجات جيبية ولكن بتشويش معين. وبإستخدام عناصر إلكترونيات القدرة ذات السرعات العاليــة فــي عمليات الفصل والوصل، فإنه يمكن تخفيض هذه التوافقيــات بإســتخدام تقنيــات الفصل والوصل لهذه العناصر.

تستخدم العاكسات بشكل واسع في التطبيقات الصناعية المختلفة مثل التحكم بسرعات المحركات، وفي مصادر القدرة الاحتياطية (***UPS***)، حيث أن مصدر القدرة يمكن أن يكون عبارة عن بطارية أو خلايا شمسيه أو أي مصدر آخر من مصادر القدرة المستمرة.

٧-١- تصنيف العاكسات

تصنف العاكسات لعدة أمور منها:-

١- بالنسبة لطبيعة مصدر التغذية:-

أ- عاكس بمنبع تيار (Current Source Inverter).

ب- عاكس بمنبع جهد (Voltage Source Inverter).

٢- طبيعة العنصر المستخدم:-

أ- عاكس يستخدم المقوم السيلكوني المحكوم (SCR Inverter).

ب- عاكس يستخدم عناصر الكترونية متحكم ببوابتها (Gate Commutation Device).

٣- طبيعة عمل الدائرة:-

أ- عاكس نصف موجة (Half Bridge).

ب- عاكس موجة كاملة (Full Bridge).

٤- طبيعة جهد الخرج:-

أ- موجة مربعة (Square Wave).

ب- موجة شبة مربعة (Quasi-Square Wave).

ج- موجة جيبيه (Sine-Wave).

٥- حسب عدد الأطوار:-

أ- عاكسات أحادية الطور (Single-Phase Inverters).

ب- عاكسات ثلاثية الطور (Three-Phase Inverters).

وكل نوع من الأنواع السابقة يمكن أن يعمل ضمن أحد الآليات التالية:-

١- عاكسات متحكمة بعرض النبضة (PWM Inverters).

٢- عاكسات الرنين (العاكسات النبضية) (Resonant Inverters).

٣- عاكسات بدوائر تبديل مساعدة (Auxiliary Commutated Inverters).

٤- عاكسات بدوائر تبديل متممة (Complementary Commutated Inverters).

وتسمى العاكسات بعاكسات الجهد الثابت (Voltage-Fed Inverters)، إذا كان جهد الدخل ثابت. وإذا بقي تيار الدخل ثابت تسمى هذه العاكسات بعاكسات التيار الثابت (Current-Fed Inverters). اما إذا كان جهد الدخل متغير ومتحكم به، فتسمى هذه العاكسات في هذه الحالة بعاكسات الجهد متغير (Variable Dc Linked Inverters).

٧-٢- العاكسات أحادية الطور

٧-٢-١- العاكس أحادى الطور نصف جسري بحمل مادي

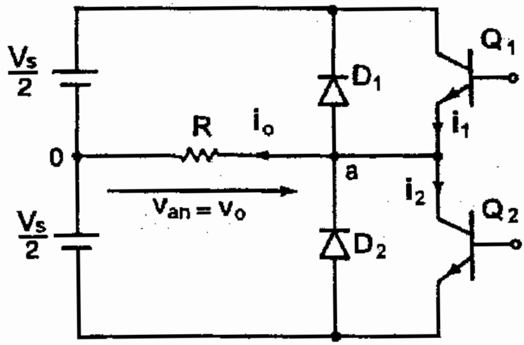
Single-Phase half-bridge Resistance Load Inverter

مبدأ عمل العاكسات (Principle of Operation):-

الدائرة المبينة في الشكل (٧-١)، وهي دائرة عاكس أحادية الطور (نصف جسري) (Single-Phase Half-Bridge Inverter). تتألف هذه العاكسات من مقطعيين (Tow-Choppers).

عندما يكون الترانزوستور (Q_1) فقط في حالة التوصيل خلال نصف الزمن الدوري $\left(\frac{T_o}{2}\right)$، فإن القيمة اللحظية للجهد على طرفي الحمل تساوي $\left(\frac{V_S}{2}\right)$. عندما يكون الترانزستور (Q_2) فقط في حالة التوصيل عند الزمن

$\left(\frac{T_o}{2}\right)$، فإن الجهد على الحمل يساوي $\left(-\frac{V_S}{2}\right)$. يجب أن تصمم الدائرة بحيث لا يعمل الترانزوستور (Q_1) والترانزستور (Q_2) في نفس الوقت.



الشكل (٧-١)

دائرة عاكس أحادية الطور (نصف جسري)

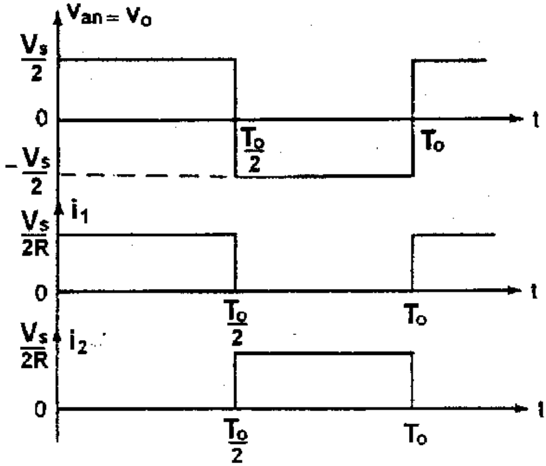
والشكل (٧-٢) يبين الجهد على الحمل والتيار للترانزوستورات من اجل حمل مادي. وهذا النوع من العاكسات يتطلب مصدر جهد مستمر بثلاثة أسلاك.

وتكون القيمة الفعالة لجهد الخرج تعطى بالعلاقة:-

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{T_o} \int_0^{\frac{T_o}{2}} \left(\frac{V_S}{2}\right)^2 .dt} = \frac{V_S}{2} \qquad (7.1)$$

والقيم الفعالة للموجة الأساسية لجهد الخرج:-

$$V_1 = \frac{2V_S}{\sqrt{2}.\pi} = 0.45V_S \qquad (7.2)$$



الشكل (٧-٢)

شكل اشارة الجهد على الحمل والتيار للترانزوستورات من اجل حمل [illegible]

وتكون قيمة تيار الحمل (i_o) مساوية إلى:-

$$0 < t < \frac{T}{2} \qquad\qquad i_o = \frac{V_o}{R} = \frac{V}{2R}$$

$$\frac{T}{2} < t < T \qquad\qquad i_o = \frac{V_o}{R} = -\frac{V}{2R}$$

وتردد موجة الخرج:-

$$f_o = \frac{1}{T}$$

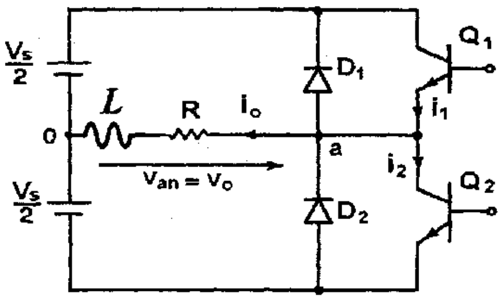
ويمكن تغير قيمة هذا التردد بالتحكم بزمن إشارة التحكم على العناصر المستخدمة.

٧-٢-٢- العاكس أحادى الطور نصف جسري بحمل مادي حثي

Single-Phase Inverters with RL Load

الدائرة المبينة في الشكل (٧-٣)، وهي دائرة عاكس أحادية الطور نصف جسري بحمل مادي حثي.

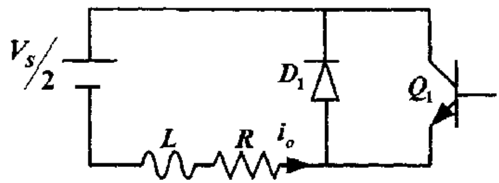
في هذه اللحظة يتم تقسيم عمل الدائرة إلى أربعة مراحل من العمل:-



الشكل (٧-٣)

دائرة عاكس أحادية الطور نصف جسري بحمل مادي حثي

المرحلة الأولى:- في الفترة بين $(0 < t < t_1)$.



الشكل (٧-٤)

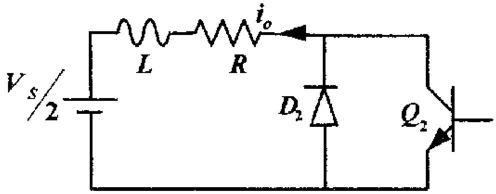
دائرة عاكس أحادية الطور نصف جسري بحمل مادي حثي عند اللحظة $(t = 0)$

في اللحظة $(t = 0)$ فإنه يتم إزالة إشارة التحكم عن الترانزوستور (Q_2) وتطبيقها على الترانزوستور (Q_1)، كما في الشكل (٧-٤). ويكون التيار في هذه اللحظة بقيمه عظمى سالبة، لا يستطيع هذا التيار التحول بشكل مباشر إلى القيمة الموجبة بسبب الحمل الحثي. وبالتالي يقوم الديود (D_1) بتامين مدى لهذا التيار من الحمل إلى مصدر الجهد ويبقى الترانزوستور (Q_1) في حالة فصل مع وجود إشارة تحكم على بوابته بسبب جهد الانحياز العكسي حتى تصل قيمة هذا التيار إلى الصفر عند اللحظة $(t = t_1)$.

المرحلة الثانية:- خلال الفترة بين $\left(t_1 < t < \frac{T}{2}\right)$.

في اللحظة (t_1) يبدأ التيار بعكس اتجاهه وبالتالي يبدأ الترانزوستور (Q_1) بالتوصيل ويصبح تيار الحمل موجب القيمة وتزداد قيمته حتى يصل إلى قيمته العظمى في الاتجاه الموجب عندما $\left(t = \frac{T}{2}\right)$، وفي هذه اللحظة يتم إزالة إشارة التحكم عن الترانزوستور (Q_1) وتطبيقها على الترانزوستور (Q_2).

المرحلة الثالثة:- خلال الفترة بين $\left(\frac{T}{2} < t < t_2\right)$، كما في الشكل (٧-٥).



الشكل (٧-٥)

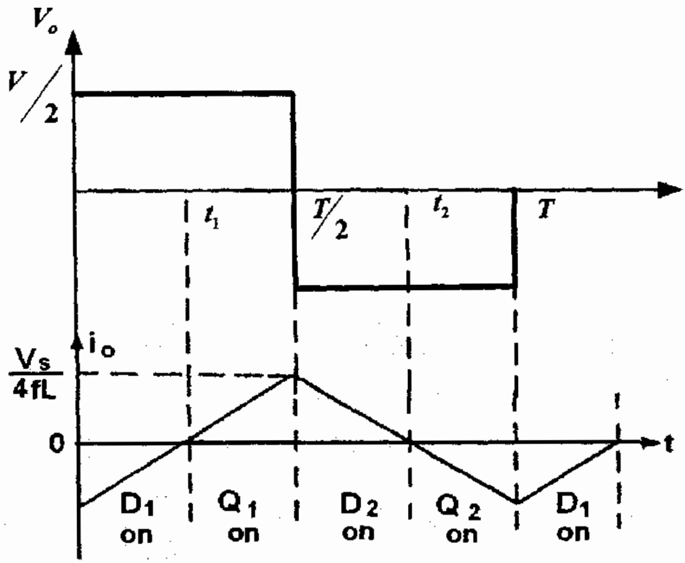
دائرة العاكس العاملة في المرحلة الثالثة

في هذه اللحظة يكون التيار موجباً وبقيمته العظمى ولا يستطيع أن يتحول بشكل كامل إلى الاتجاه المعاكس بالسرعة الممكنة، وبالتالي يحتاج إلى بعض الوقت حتى تصل قيمته للصفر ومن ثم يتم عكس اتجاهه. وجهد الملف في هذه الحالة يعاكس جهد المصدر. يقوم الديود (D_2) بتمرير التيار من الحمل إلى مصدر الجهد ويتناقص هذا التيار حتى يصل إلى الصفر عند اللحظة $(t = t_2)$، وخلال هذه الفترة يكون الجهد سالباً والتيار موجب القيمة، وبالتالي تزود القدرة إلى مصدر الجهد السفلي.

المرحلة الرابعة:- خلال الفترة بين $(t_2 < t < T)$.

عند اللحظة $(t = t_2)$ تصبح قيمة التيار مساوية للصفر ومن ثم تزداد قيمة هذا التيار بالاتجاه السالب نتيجة توصيل الترانزستور (Q_2)، ويكون الجهد المطبق على الحمل سالب القيمة، ويستمر التيار بالمرور بالاتجاه السالب إلى أن يصل إلى

قيمته السالبة العظمى عند اللحظة $(t = T)$، وتعاد الكرة مرة أخرى، وبالتالي يمكن رسم موجة الجهد والتيار للعاكس أحادي الطور نصف موجة بحمل مـادي حسـب الشكل (٧-٦). يمكن استبدال الترانزوستور بثايروسـتورات (GTO_S) أو بثايروستورات ذات التبديل القسري بزمن إطفاء (t_{off})، بحيث يكون زمن التوصيل الأكبر لهذا الترانزوستور يساوي إلى $\left(\frac{T_o}{2} - t_{off}\right)$.



الشكل (٧-٦)

موجة الجهد والتيار على الحمل وفترات التوصيل للديود والترانزوستور

معادلات الجهد:-

خلال الفترة $\left(0 < t < \frac{T}{2}\right)$

تعطى معادلة الجهد بالشكل التالي:-

$$\frac{V_S}{2} = R\, i_o(t) + L\frac{di_o(t)}{dt} \qquad (7.3)$$

وحل هذه المعادلة يكون:-

$$i_o(t) = \frac{V_S}{2R}\left[1 - e^{-Rt/L}\right] - I_o . e^{-tR/L} \qquad (7.4)$$

حيث أن قيمة (I_o) تمثل القيمة الابتدائية للتيار، ويمكن تحديدها من الشروط الابتدائية الخاصة للدائرة حسب قيمة التيار $(i_o(t))$ تساوي (I_o) في اللحظة $\left(t = \frac{T}{2}\right)$، وبالتعويض في المعادلة (٧-٤) نحصل على:-

$$i_o\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{V_S}{2R}\left[1 - e^{-RT/2L}\right] - I_o . e^{-TR/2L}$$

وبالتعويض في المعادلة (٧-٤) للتيار نحصل على:-

$$i_o(t) = \frac{V_S}{2R}\left[1 - e^{-Rt/L}\right] - \frac{V}{2R}\frac{\left[1 - e^{-RT/2L}\right]}{\left[1 + e^{-RT/2L}\right]} . e^{-tR/L}$$

$$i_o(t) = \frac{V_S}{2R}\left[\frac{\left[1 - e^{-Rt/L}\right]\left[1 + e^{-RT/2L}\right] - \left[1 - e^{-RT/2L}\right] e^{-tR/L}}{\left[1 + e^{-RT/2L}\right]}\right]$$

$$i_o(t) = \frac{V_S}{2R}\left[\frac{\left[1 + e^{-RT/2L}\right] - e^{-R.t/L}\left[1 + e^{-RT/2L}\right] - \left[1 - e^{-RT/2L}\right] e^{-tR/L}}{\left[1 + e^{-RT/2L}\right]}\right]$$

$$i_o(t)=\frac{V_S}{2R}\left[\frac{\left[1+e^{-RT/2L}\right]-e^{-R.t/L}\left[1+e^{-RT/2L}-1+e^{-RT/2L}\right]}{\left[1+e^{-RT/2L}\right]}\right]$$

$$i_o(t)=\frac{V}{2R}\left[1-\frac{2\ .\ e^{-R.t/L}}{\left[1+e^{-RT/2L}\right]}\right] \qquad (7.6)$$

خلال الفترة $\left(\frac{T}{2}<t<T\right)$ يمكن كتابة المعادلة التالية للجهود:-

$$-\frac{V_S}{2}=R\,i_o(t')+L\frac{di_o(t')}{dt'} \qquad (7.7)$$

حيث أن $\left(t'=t-T/2\right)$ والحل لهذه المعادلة يكون من الشكل:-

$$i_o(t')=-\frac{V_S}{2R}\left[1-e^{-Rt'/L}\right]-I_o.e^{-t'R/L} \qquad (7.8)$$

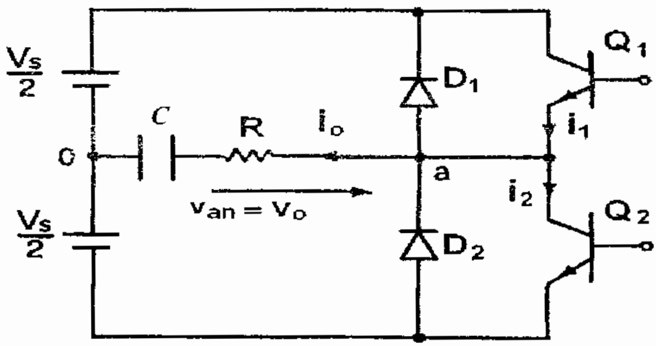
$$I_o=-\frac{V_S}{2R}\frac{\left[1-e^{-RT/2L}\right]}{\left[1+e^{-RT/2L}\right]} \qquad (7.9)$$

$$i_o(t')=-\frac{V_S}{2R}\left[1-\frac{2\ .\ e^{-R.t'/L}}{\left[1+e^{-RT/2L}\right]}\right]$$

$$=-\frac{V_S}{2R}\left[1-\frac{2\ .\ e^{-\frac{R}{L}\left(t-\frac{T}{2}\right)}}{\left[1+e^{-RT/2L}\right]}\right] \qquad (7.10)$$

٧-٢-٣- العاكس أحادى الطور نصف جسري بحمل مادي سعوي
Single-Phase Inverters with RC Load

أذا تم إغلاق الترانزستور (Q_1) خلال الفترة $\left(0<t<\frac{T}{2}\right)$ في الدائرة المبينة في الشكل (٧-٧)، سوف يمر تيار موجب خلال الحمل يبدأ من قيمته العظمى الموجبة حتى يصل إلى قيمة الصفر الموجب في اللحظة $\left(t=\frac{T}{2}\right)$. ويبدأ المكثف بالشحن وتزداد قيمة جهد المكثف من القيمة $(-V_o)$ إلى القيمة $(+V_o)$ عند اللحظة $\left(t=\frac{T}{2}\right)$. وبالتالي يتناقص تيار الشحن بشكل أسي.



الشكل (٧-٧)

دائرة عاكس أحادية الطور نصف جسري بحمل مادي سعوي

خلال الفترة $\left(\frac{T}{2}<t<T\right)$، يتم فتح الترانزستور (Q_1) وإغلاق الترانزستور (Q_2). وفي هذه الحالة يمر تيار حمل سالب القيمة خلال الحمل مما يؤدي إلى شحن المكثف بشحنة معاكسة للحالة الأولى، حيث يتغير جهد المكثف من $(+V_o)$ إلى أن تصل $(-V_o)$ عند اللحظة $(t=T)$. وتعاد الدورة مرة أخرى وهكذا.

يبين الشكل (٧-٨) شكل موجة جهد الحمل وتيار الحمل وجهد المكثف.

يعطى الجهد في دائرة عاكس أحادي الطور نصف موجة بمـــصدر جهــد بالعلاقة التالية:-

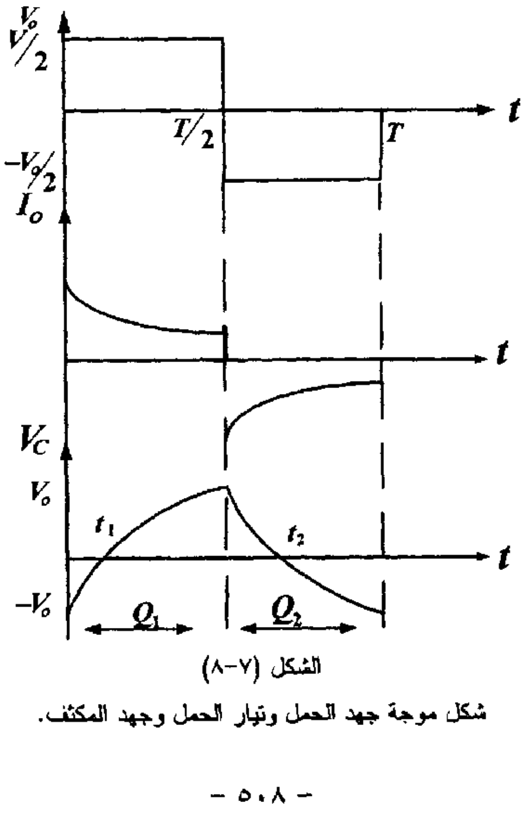
$$i_o(t) = C\frac{dV_C(t)}{dt} \quad (7.11)$$

$$\frac{V_S}{2} = R.C\frac{dV_C(t)}{dt} + V_C(t) \quad (7.12)$$

حيث أن $(V_C(t))$ هو الجهد على طرفي المكثف.

وحل المعادلة التفاضلية يكون من الشكل:-

$$V_C(t) = \frac{V_S}{2}\left[1 - e^{-t/R.C}\right] - V_o\, e^{-t/R.C} \quad (7.13)$$



الشكل (٧-٨)

شكل موجة جهد الحمل وتيار الحمل وجهد المكثف.

وعند اللحظة $\left(t=\frac{T}{2}\right)$ فإن قيمة الجهد $\left(V_C\left(\frac{T}{2}\right)=V_o\right)$ نحصل على:-

$$V_o=\frac{V_S}{2}\frac{\left[1-e^{-\frac{T}{2R.C}}\right]}{\left[1+e^{-\frac{T}{2R.C}}\right]} \qquad (7.14)$$

وبالتالي فإن:-

$$V_C(t)=\frac{V_S}{2}\left[1-e^{-t/R.C}\right]-\frac{V}{2}\frac{\left[1-e^{-\frac{T}{2R.C}}\right]}{\left[1+e^{-\frac{T}{2R.C}}\right]}e^{-t/R.C} \qquad (7.15)$$

$$V_C(t)=\frac{V_S}{2}\left[1-\frac{2}{1+e^{-\frac{T}{2R.C}}}e^{-t/R.C}\right] \qquad (7.16)$$

$$i_o(t)=C\frac{dV_C(t)}{dt}=\frac{sV}{R}\left[\frac{e^{-t/R.C}}{1+e^{-\frac{T}{2R.C}}}\right] \qquad (7.17)$$

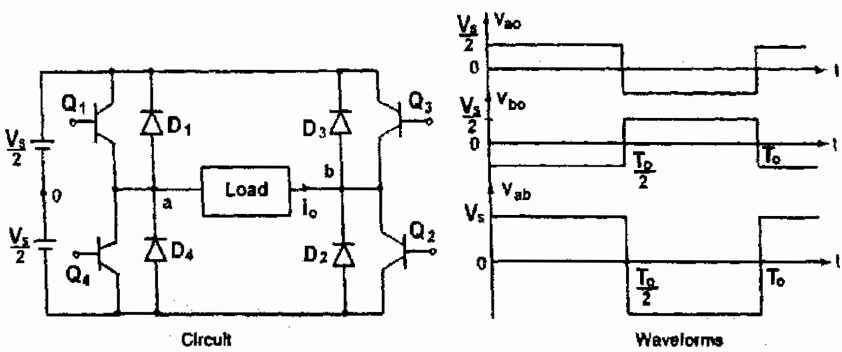
وخلال الفترة $\left(\frac{T}{2}<t<T\right)$ يكون الزمن مزاحاً بفترة مقدارها $\left(\frac{T}{2}\right)$، حيث أن $\left(t'=t-\frac{T}{2}\right)$ويكون:-

$$V_C(t')=-\frac{V_S}{2}\left[1-\frac{2e^{-t'/R.C}}{1+e^{-\frac{T}{2R.C}}}\right] \qquad (7.18)$$

$$i_o(t') = -\frac{V_S}{R}\left[\frac{e^{-t'/R.C}}{1+e^{-\frac{T}{2R.C}}}\right] \qquad (7.19)$$

٧-٢-٤- عاكس أحادي الطور موجة كاملة بمصدر جهد
Single-Phase Full- Bridge Voltage Source Inverters

في حال توصيل الترانزوستور (Q_1,Q_2) في نفس الوقت فان التيار يمر من خلال الحمل ويكون الجهد الظاهر على الحمل يساوي (V_S). وعندما يتم توصيل (Q_3,Q_4) في الجزء التالي من الموجة فان التيار يمر من خلال الحمل ويكون الجهد الخارج على الحمل يساوي إلى $(-V_S)$. يبين الشكل(٧-٩) الدائرة الكهربائية للعاكس الجسري مع حمل مادي وشكل الإشارات الخارجة.

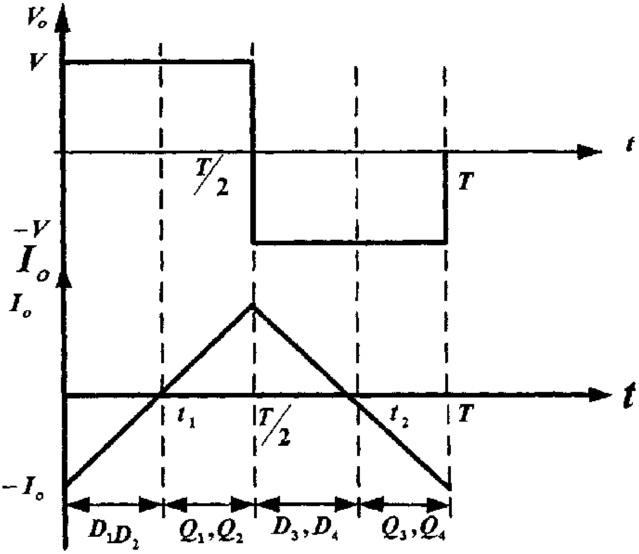


الشكل (٧-٩)

الدائرة الكهربائية للعاكس وشكل الإشارات الخارجة

من أجل الحمل المادي لهذا النوع من العاكسات يتم إغلاق الترانزوستورين (Q_1,Q_2) خلال نصف الزمن الدوري $\left(0<t<\frac{T}{2}\right)$ ويكون جهد الحمل مساوياً الى جهد المصدر (V_S) وعند الزمن $\left(\frac{T}{2}\right)$ يتم فتح كلاً من الترانزوستورين (Q_1,Q_2) وإغلاق الترانزوستورين (Q_3,Q_4) ويصبح جهد الحمل مساوياً إلى $(-V_S)$، وتعاد الدورة مرة أخرى. ويكون جهد الحمل كما هو مبين في الشكل (٧-٩). وتيار الحمل يكون متوافقاً مع هذا الجهد مع اختلاف في القيمة.

من أجل الحمل الحثي المادي لهذا النوع من العاكسات خلال الفترة $(0<t<t_1)$ تكون قيمة تيار الحمل ذات قيمة عظمى سالبة تزداد هذه القيمة لتصل إلى الصفر عند اللحظة (t_1). وخلال الفترة $\left(t_1<t<\frac{T}{2}\right)$ يستمر تيار الحمل بالزيادة بالاتجاه الموجب حتى يصل إلى قيمته العظمى عند اللحظة $\left(\frac{T}{2}\right)$. خلال الفترة $\left(\frac{T}{2}<t<t_2\right)$ يبدأ تيار الحمل بالتناقص حتى يصل إلى الصفر عند اللحظة $(t=t_2)$. وخلال الفترة $(t_2<t<T)$ يستمر التيار بالزيادة في الاتجاه السالب حتى يصل إلى قيمته العظمى عند اللحظة $(t=T)$.



الشكل (٧-١٠)

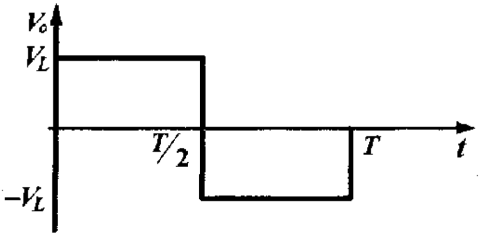
شكل موجة التيار وفترات التوصيل في حالة الحمل الحثي

يتم فتح كلاً من الترانزوستورين (Q_1,Q_2) وإغلاق الترانزوستورين (Q_3,Q_4) ويصبح جهد الحمل مساوياً إلى $(-V_S)$، وتعاد الدورة مرة أخرى. ويكون جهد الحمل كما هو مبين في الشكل (٧-٩). وتيار الحمل يكون متوافقاً مع هذا الجهد مع اختلاف القيمة.

عندما يكون الحمل حثياً فإن شكل موجة التيار وفترات التوصيل للعناصر المستخدمة تكون كما هو مبين في الشكل (٧-١٠).

والعلاقات التي تم الحصول عليها سابقاً من أجل العاكس أحادي الطور نصف موجة يمكن الحصول عليها من أجل العاكس أحادي الطور موجة كاملة بتعويض كامل قيمة الجهد (V) بدل $\left(\frac{V}{2}\right)$ في نفس العلاقات السابقة.

استخدام تحليل فوريير لتحليل موجة الجهد المربعة :-



الشكل(٧-١١)

موجة مربعة على مخرج العاكس

جهد الخرج للموجة المربعة للعاكس الشكل (٧-١١)، يمكن أن يحلل باستخدام سلسلة فوريير على النحو التالي:-

$$v_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n Cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n Sin(n\omega t) \qquad (7.20)$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T v_o(t) Cos(n\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} v_o(t) Cos(n\omega t) d\omega t \qquad (7.21)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T v_o(t) Sin(n\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} v_o(t) Sin(n\omega t) d\omega t \qquad (7.22)$$

وبما أن موجة الخرج المربعة هي موجة متماثلة، بالتالي فإن $(a_n = 0)$ وتظهر فقط قيمة (b_n).

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} v_o(t) Sin(n\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} v_L Sin(n\omega t) d\omega t + \frac{1}{\pi}\int_{\pi}^{2\pi} (-v_L) Sin(n\omega t) d\omega t \qquad (7.23)$$

$$b_n = \frac{4V_L}{n\pi} \qquad for \quad n = 1,3,5,.....$$

$$b_n = 0 \qquad for \quad n = 2,4,6,.....$$

$$v_o(t)=\sum_{n=1,3,5}^{\infty}\frac{4V_L}{n\pi}Sin(n\omega t)$$
$$=\frac{4V_L}{\pi}\left[Sin\ \omega t+\frac{1}{3}Sin(3\omega t)+\frac{1}{5}Sin(5\omega t)+.....\right] \qquad (7.23)$$

وتكون القيمة الفعالة للجهد من أجل الهارمونية (n) حسب العلاقة:-

$$V_n=\frac{4V_L}{n\pi\sqrt{2}}=\frac{0.9}{n} \qquad for\ n=1,3,5,.....$$

والقيمة الفعالة للجهد من أجل الهارمونية الأساسية (الأولى) تساوي:-

$$V_1=0.9V_L$$

مثال (٧-١):- عاكس أحادي الطور نصف جسري بحمـــل مـــادي $(R=10\,\Omega)$ يتغذى من مصدر قيمته $(V=240V)$. أوجد:-

١- القيمة الفعالة لجهد الخرج.

٢- القدرة الخارجة.

٣- الفولتية على طرفي العنصر شبه الموصل.

٤- أقل رتبة للتوافقيات ومعامل التوافقية.

٥- القيمة الفعالة والقيمة المتوسطة للتيار خلال العنصر شبه الموصل.

الحل:-

القيمة العظمى للفولتية الخارجة على الموجة المربعة هي:-

$$V_L=\frac{240}{2}=120\ V \qquad i_o=\frac{V_L}{R}=\frac{120}{10}=12\ \ A$$

وتكون القيمة الفعالة باستخدام تحليل فوريير:-

$$v_o(t) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{4V_L}{n\pi} Sin(n\omega t)$$

$$v_o(t) = \frac{4 \times 120}{\pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{Sin(n\omega t)}{n}$$

$$v_o(t) = 152.79\left[Sin(\omega t) + \frac{Sin(3\omega t)}{3} + \frac{Sin(5\omega t)}{5} + ...\right]$$

١- القيمة الفعالة لجهد الخرج للتوافقية الأساسية :-

$$V_1 = 152.79 \times \sqrt{2} = 108.04\ V$$

٢- القدرة الخارجة.

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} = \frac{V_L^2}{R} = \frac{120 \times 120}{10} = 1440\ W$$

٣- الفولتية على طرفي العنصرين شبه الموصلين.

$$2V_L = 2 \times 120 = 240V$$

٤- أقل رتبة للتوافقيات ومعامل التوافقية.

أقل رتبة للتوافقيات هي الثالثة وتساوي:-

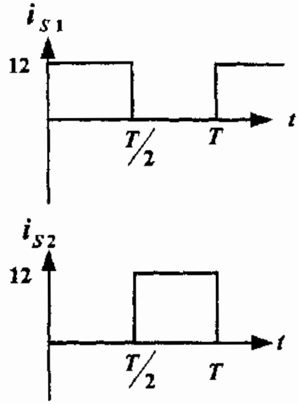
$$V_3 = 152.79\left(3\sqrt{2}\right) = 36.01\ V$$

معامل التوافقية:-

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1}$$

$$HF_3 = \frac{V_3}{V_1} = \frac{36.01}{108.04} = 0.333$$

٥- القيمة الفعالة والقيمة المتوسطة للتيار خلال العنصر شبة الموصل والمبينة في الشكل (٧-١٢).



الشكل (٧-١٢) القيمة الفعالة والمتوسطة للتيار خلال العنصر شبه الموصل

القيمة العظمي لتيار الخرج للموجة المربعة هو:-

$$\frac{120}{10} = 12\ A$$

يمكن الحصول على القيمة المتوسطة للتيار للعنصر شبة الموصل من:-

$$I_{S(avg)} = \frac{1}{T}\int_0^{T/2} 12\ dt = \frac{12\left(T/2\right)}{T} = 6A$$

يمكن الحصول على القيمة الفعالة للتيار للعنصر شبة الموصل من:-

$$I_{S(rms)} = \left[\frac{1}{T}\int_0^{T/2} (12)^2\ dt\right]^{1/2} = \left[\frac{1}{T}\times(12)^2\times\frac{T}{2}\right]^{1/2} = \frac{12}{\sqrt{2}} = 8.48\,A$$

مثال (٧-٢):- عاكس أحادي الطور نصف موجة بمصدر جهد قيمته $(V = 500\,V)$ يغذي حمل مادي حثي $L = 0.1\,H$, $(R = 20\ \Omega)$. إذا كان تردد جهد المخرج يساوي $(50\,Hz)$ أوجد:-

١- تيار المخرج عند نهاية الدورة الأولى.

٢- التعبير الرياضي المتعلق بتيار الخرج لنصفي الدورات.

٣-معامـــل التوافقيـــة الكلـــي لتيـــار الحمـــل (THD). (Total Harmonic Distortion) :- معامل يقيس التقارب بين الموجـــة والمركبـــات الأساســـية ويعطى بالعلاقة التالية:-

$$THF = \frac{1}{V_1}\sqrt{\sum_{n=2,3,....}^{\infty} V_n^2}$$

للعاكس نصف موجة فإن فولتية الموجة المربعة هي:-

$$V_L = \frac{V_S}{2} = \frac{500}{2} = 250\ V$$

الثابت الزمني:-

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0.1}{20} = .005\ S$$

زمن دورة الخرج هي:-

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02\ S$$

عند الزمن $(t = 0)$ فإن:-

$$V_L = R\,i_o(t) + L\frac{di(t)}{dt}$$

وأن:-

$$i_o(t) = \frac{V_L}{R}\left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right] + I_o e^{-\frac{t}{\tau}}$$

وبما أن التيار عند الزمن $(t = 0)$ يساوي الصفر $(I_o = 0)$ نحصل على:-

$$i_o(t) = \frac{250}{20}\left[1 - e^{-\frac{t}{0.005}}\right] = 12.5\left(1 - e^{-200t}\right)$$

وفي نصف الدورة عند $\left(t = T/2 = 0.01\,S\right)$ فإن:-

$$i_o(t) = 12.5\left(1 - e^{-200t}\right) = 12.5\left(1 - e^{2}\right) = 10.81\ A$$

وفي النصف الثاني من الدورة يكون التيار عكسي وبقيمة:-

$$i_o(t') = -12.5\left[1 - e^{-200t'}\right] + 10.81\,e^{-200t'}$$

وعند نهاية الدورة الأولى عند الزمن $\left(t' = t - T/2\right)$:-

$$t' = 0.02 - \frac{0.02}{2} = 0.01\,S$$

وبالتالي:-

$$i_o(t') = 12.5\left[1 - e^{-2}\right] + 10.81\,e^{-2} = -9.345\,A$$

للحصول على تيار الحمل في الحالة المستقرة للنصف الموجب من الدورة:-

$$i_o = \frac{V_L}{R}\left[1 - \frac{2}{1 + e^{-T(2\tau)}}e^{-t/\tau}\right]$$

$$= \frac{250}{20}\left[1 - \frac{2}{1 + e^{-2}}e^{-200t}\right]$$

$$= 12.5\left(1 - 1.76\,e^{-200t}\right)$$

وللحصول على تيار الحمل في النصف السالب من الدورة:-

$$i_o = -12.5\left(1 - 1.76\,e^{-200(t-0.01)}\right)$$

ولإيجاد قيمة التيار الفعال لعدد من التوافقيات نستخدم:-

$$I_n = \frac{4V_L}{n\pi\sqrt{2}\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} = \frac{225.08}{n\sqrt{400 + 986.9n^2}} \qquad , n = 1,3,5,.....$$

ولكن لإيجاد قيمة التيار عند قيم مختلف لـ (n) يكون:-

$$I_1 = 6.044\ ,\ I_3 = 0.7785\ ,\ I_5 = 0.2845\ ,$$
$$I_7 = 0.1455\ ,\ I_9 = 0.088\ ,\ I_{11} = 0.05585\ ,$$

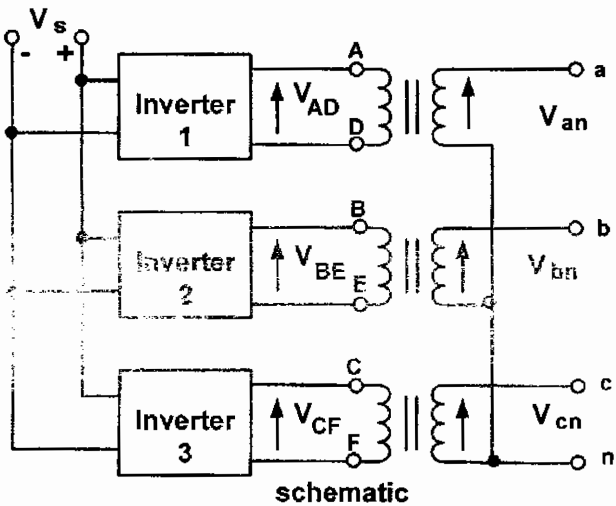
ولإيجاد (THD) لتيار الحمل من العلاقة:-

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + ...}}{I_1} = 0.1403\ or\ 14.03\%$$

٧-٣- العاكسات ثلاثية الأطوار

Three-Phase Inverters

تستخدم من اجل التطبيقات ذات القدرات العالية. وهي تتألف من ثلاثة عاكسات أحادية الطور (نصف جسرية) موصولة مع بعضها البعض على التوازي كما هو مبين في الشكل (٧-١٣).



الشكل (٧-١٣)

عاكس ثلاثي الأطوار

زاوية فرق الطور بين المحولات الثلاثة يجب أن تساوي إلى (120°)، وذلك للحصول على خرج ثلاثي الطور متزن.

ملفات المحول الابتدائية يجب أن تكون معزولة عن بعضها البعض بينما توصل ملفات الملف الثانوي بشكل نجمي أو مثلي. وفي العادة يتم وصل ملفات الثانوي بشكل نجمي من اجل التخلص من التوافقيات الثلاثية $n = (3,6,9,...)$.

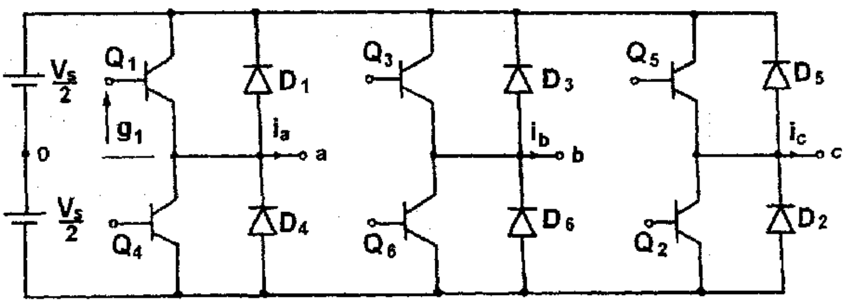
٧-٣-١- العاكسات ثلاثية الأطوار نصف جسرية

Three-Phase Inverters

من مواصفات العواكس ثلاثية الطور أنها يمكن أن تستخدم نمطين من التوصيل وذلك باستخدام زوايا التوصيل أما أن تستخدم زاوية التوصيل للترانزستور (°180) أو أن تستخدم زاوية التوصيل للترانزستور (°120).

١- العاكس ذو نمط التوصيل (°180).

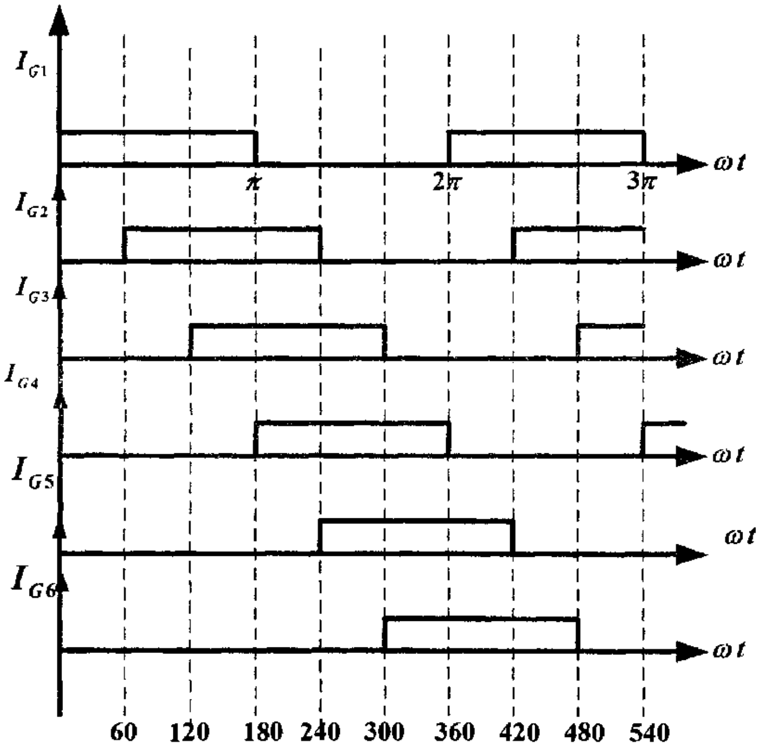
الشكل (٧-١٤) يبين الدائرة الكهربائية لهذا النوع من العاكسات. في هذا النمط يتم التحكم بتوصيل الترانزستورات في النصف الموجب للموجة، أي خلال (°180)، حيث تقدح الترانزستورات تباعاً بفترات مقدارها (°60).



الشكل (٧-١٤)
عاكس ثلاثي الأطوار نصف جسرية

عندما يتم توصيل الترانزوستور (Q_1)، فإن الطرف (a) يوصل إلى الطرف الموجب لمصدر التغذية. وعندما يوصل الترانزستور (Q_4)، فإن الطرف (a) يوصل إلى الطرف السالب لمصدر التغذية. وهنالك ستة أوضاع عمل لهذه الدائرة خلال الدورة الكاملة. وفترة التوصيل لكل وضع تساوي إلى (°60). والترانزستورات في الدائرة مرقمة حسب التوصيل لكل ترانزوستور

(123,234,345,456,561,612)، وكل ترانزوستور يوصل لفتـــرة زمنيـــة تـــساوي (180°) وفترة التوصيل لكل ترانزوستور مزاحة بزاوية مقدارها (60°) من اجـــل الحصول على جهد ثلاثي الطور متزن.

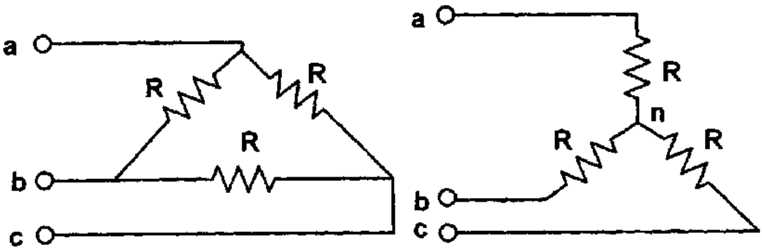


الشكل (٧-١٥)

إشارات القدح للعاكس ثلاثي الطور عند زاوية التوصيل (180°)

جهود خطوط الخرج تكون مزاحة عن بعضها البعض بزاوية فرق طور (120°). والشكل (٧-١٥) يبين إشارات قدح الترانزستورات للعاكس ثلاثي الطـــور عنـــد

زاوية التوصيل ($180°$). الحمل لهذه العاكسات يمكن أن يوصل بشكل نجمي أو مثلثي كما هو مبين في الشكل (٧-١٦). في هذه الحالة تكون ثلاثة ترانزستورات في حالة توصيل دائماً في كل فترة، حيث يكون أثنين منها في حالة توصيل متشابه (موجب أو سالب) والثالث يكون مختلف (سالب أو موجب). وعندما تنتهي الدورة ستكون مقسمة إلى ست وضعيات كل منها تمثل فرق في التوصيل ($60°$). ويكون عدد الترانزستورات المستخدمة في هذه الحالة يساوي (6) وعدد الديودات المستخدمة في هذه الحالة يساوي (6). من اجل التوصيل المثلثي للحمل فان تيار الطور يمكن حسابه مباشرة من جهد الخط وبالتالي يمكن حساب تيار الخط. ومن اجل التوصيل النجمي للحمل فإنه لابد من حساب جهد الطور من اجل الحصول على تيار الطور ومن ثم حساب تيار الخط.



الشكل (٧-١٦)

يوصل الحمل في العاكسات بشكل نجمي أو مثلثي

فإذا كانت خطوط الحمل (A, B, C) موصولة مع نقطة وسطية (O , N) فإن جهود الخط تكون (V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}) وتعطى قيمها في الجدول رقم (١).

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN}$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN}$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN}$$

الفترة	توصيل الترانزستورات	جهد الطور			جهد الخط		
		V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}
$0^o - 60^o$	Q_5, Q_6, Q_1	V_S	0	V_S	V_S	$-V_S$	0
$60^o - 120^o$	Q_6, Q_1, Q_2	V_S	0	0	V_S	0	$-V_S$
$120^o - 180^o$	Q_1, Q_2, Q_3	V_S	V_S	0	0	$-V_S$	$-V_S$
$180^o - 240^o$	Q_2, Q_3, Q_4	0	V_S	0	$-V_S$	V_S	0
$240^o - 300^o$	Q_3, Q_4, Q_5	0	V_S	V_S	$-V_S$	0	V_S
$300^o - 360^o$	Q_4, Q_5, Q_6	0	0	V_S	0	$-V_S$	V_S

الجدول رقم (١) حالة التوصيل للترانزستورات وفولطيات الخط والطور

وهنالك ثلاثة أوضاع للعمل في العاكسات ثلاثية الأطوار نصف الجسرية خلال نصف الدورة. والدوائر المكافئة لهذه الأوضاع مبينة حسب الأشكال في كل وضع لوحده:-

١- الوضع الأول:- يكون عندما $\left(0 \le \omega t \le \frac{\pi}{3}\right)$.



في هذه الحالة يكون:-

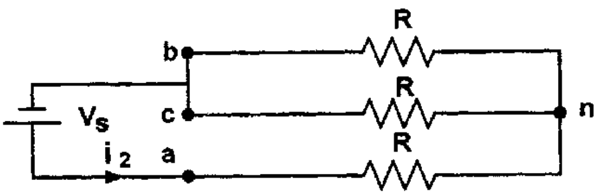
$$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2}$$

$$i_1 = \frac{V_S}{R_{eq}} = \frac{2V_S}{3R}$$

$$v_{an} = v_{cn} = i_1 . \frac{R}{2} = \frac{V_S}{3}$$

$$v_{bn} = -i_1 . R = -\frac{2V_S}{3}$$

٢- الوضع الثاني:- يكون خلال الفترة $\left(\frac{\pi}{3} \le \omega t \le \frac{2\pi}{3}\right)$.



في هذه الحالة يكون:-

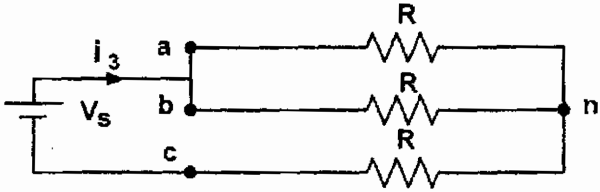
$$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2}$$

$$i_2 = \frac{V_S}{R_{eq}} = \frac{2V_S}{3R}$$

$$v_{an} = i_2 . R = \frac{2V_S}{3}$$

$$v_{bn} = v_{cn} = -\frac{i_2 . R}{2} = -\frac{V_S}{3}$$

٣- الوضع الثالث:- خلال الفترة $\left(\frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \pi\right)$.



في هذه الحالة يكون:-

$$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2}$$

$$i_3 = \frac{V_S}{R_{eq}} = \frac{2V_S}{3R}$$

$$v_{an} = v_{bn} = i_3 . \frac{R}{2} = \frac{V_S}{3}$$

$$v_{cn} = -i_3 . R = -\frac{2V_S}{3}$$

الدوائر المكافئة للوضعيات $(4,5,6)$ يمكن الحصول عليها بعكس قطبية فولطية المصدر للوضعيات $(1,2,3)$ على التوالي. جهد الطور (V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}) وجهد الخط (V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}) في حالة توصيل الحمل على شكل نجمي يعطى بالجدول رقم (٢).

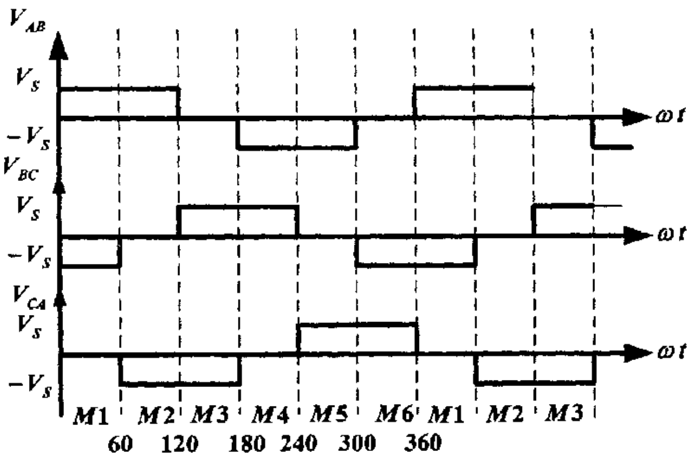
الفترة	توصيل الترانزستورات	جهد الطور			جهد الخط		
		V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}
$0^o - 60^o$	Q_5, Q_6, Q_1	$V_S/3$	$-2V_S/3$	$V_S/3$	V_S	$-V_s$	0
$60^o - 120^o$	Q_6, Q_1, Q_2	$2V_S/3$	$-V_S/3$	$-V_S/3$	V_S	0	$-V_s$

$120^o - 180^o$	Q_1, Q_2, Q_3	$V_S/3$	$V_S/3$	$-2V_S/3$	0	V_S	$-V_S$
$180^o - 240^o$	Q_2, Q_3, Q_4	$-V_S/3$	$2V_S/3$	$-V_S/3$	$-V_S$	V_S	0
$240^o - 300^o$	Q_3, Q_4, Q_5	$-2V_S/3$	$V_S/3$	$V_S/3$	$-V_S$	0	V_S
$300^o - 360^o$	Q_4, Q_5, Q_6	$-V_S/3$	$-V_S/3$	$2V_S/3$	0	$-V_S$	V_S

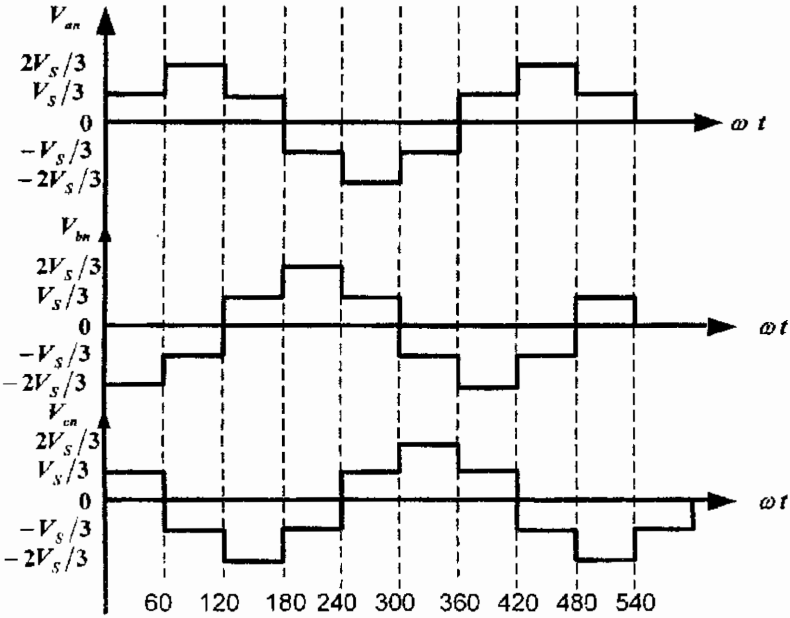
الجدول رقم (٢)

حالة التوصيل للترانزستورات وفولطيات الخط والطور

وتكون أشكال الجهود الخطية للعاكس ثلاثي الطور في حالة التوصيل النجمي عند فترة التوصيل (180°) موجودة في الشكل (٧-٢٠). وأشكال جهود الطور مبينة في الشكل (٧-١٨).



الشكل (٧-١٧) أشكال الجهود الخطية للعاكس خلال فترة التوصيل (180°)



الشكل (٧-١٨) أشكال الجهود الطورية للعاكس خلال فترة التوصيل (180°)

وباستخدام تحليلات فورير يمكن الحصول على جهود الخطوط من العلاقات:-

$$V_{AB} = \sum_{n=2K+1}^{\infty} \frac{4V_S}{n\pi} Cos\frac{n\pi}{6} Sin\left(n\,\omega t + \frac{n\pi}{6}\right) \qquad (7.24)$$

$$V_{BC} = \sum_{n=2K+1}^{\infty} \frac{4V_S}{n\pi} Cos\frac{n\pi}{6} Sin\left(n\,\omega t - \frac{n\pi}{2}\right) \qquad (7.25)$$

$$V_{CA} = \sum_{n=2K+1}^{\infty} \frac{4V_S}{n\pi} Cos\frac{n\pi}{6} Sin\left(n\,\omega t + \frac{5n\pi}{6}\right) \qquad (7.26)$$

حيث أن:- $(K = 1,2,3,.......)$

من المعادلات (٧-٢٤) و (٧-٢٥) و (٧-٢٦) فإن التوافقيات الثلاثية $(n = 3,9,....)$ تكون مساوية للصفر. وبالتالي فإن القيمة الفعالة لجهد خط-لخط تساوي:-

$$V_L = \sqrt{\frac{2}{2\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{3}} V_S^2 \; d(\omega t)} = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad V_S = 0.8165\, V_S \qquad (7.27)$$

والقيمة الفعالة لعدد $(n\,th)$ من التوافقيات لجهد الخط تعطى بالعلاقة:-

$$V_{Ln} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{4V_S}{n\pi} Cos \frac{n\pi}{6} \qquad (7.28)$$

والقيمة الفعالة الأساسية لجهد الخط تعطى بالعلاقة:-

$$V_{L1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{4V_S}{\pi} Cos \frac{\pi \; V_S}{6} = 0.78\, V_S \qquad (7.29)$$

والقيمة الفعالة لجهد الطور تعطى بالعلاقة:-

$$V_{Ph} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2}.V_S}{3} = 0.4714 V_S \qquad (7.30)$$

القدرة على مخرج العاكس تساوي:-

$$P_L = 3\frac{V_{ph}^2}{R} = \frac{2}{3}\frac{{V_S}^2}{R} \qquad (7.31)$$

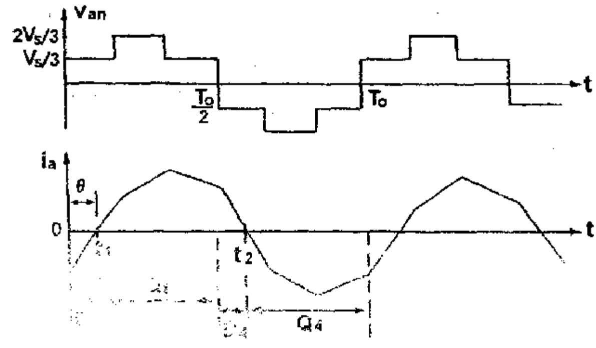
التيار في جميع الأطوار يمر في الترانزستورات العلوية للنصف الموجب من الموجة ويمر في الترانزستورات السفلية في النصف السالب من الموجة. ويمكن الحصول على القيمة الفعالة للتيار من العلاقة:-

$$I_{Q(rms)} = \frac{I_{ph}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{ph}/R}{\sqrt{2}} = \frac{V_S}{3R} \qquad (7.32)$$

في حال كون الحمل مادياً فإن الديودات الموصولة مع الترانزوستورات لا تعمل. وفي حال كون الحمل حملا حثياً فإن التيار في كل فرع من فروع العاكس سوف يتأخر عن جهد ذلك الفرع بزاوية فرق طور مقدارها (θ).

إذا أخذنا على سبيل المثال جهد الطور (V_{an})، فعندما يتم فصل الترانزوستور (Q_4)، فإن المسار السالب للتيار (i_a) سوف يكون من خلال الديود

(D_1). وبالتالي فان الطرف (a) يكون موصلا مع مصدر التغذية من خلال الديود (D_1) حتى يقوم تيار الحمل بعكس قطبيتة عند زمن $(t = t_1)$. ويكون الترانزستور (Q_1) في حالة القطع وبالمثل فان الترانزوستور (Q_4) سوف يبدأ بالتوصيل عند زمن $(t = t_2)$.



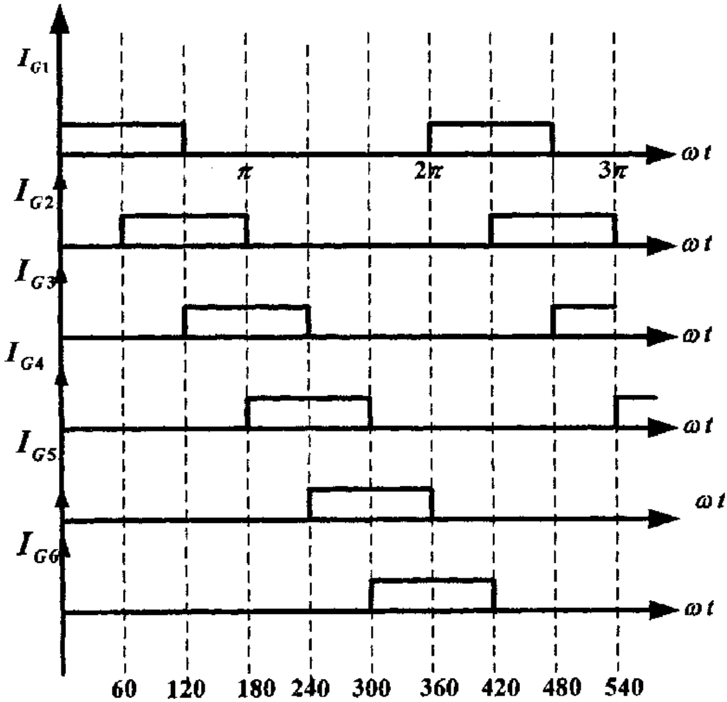
الشكل (٧-١٩)

شكل موجة التيار للحمل الحثي للطور الأول لعاكس ثلاثي [illegible]

الترانزستورات يجب أن توصل بشكل مستمر، حيث أن زمن التوصيل للترانزوستورات والديودات يعتمد على معامل القدرة للحمل. ويبين الشكل (٧-١٩) شكل موجة التيار للحمل الحثي للطور الأول.

٢- العاكس ذو نمط التوصيل $(120°)$.

في هذا النمط يتم التحكم بتوصيل الترانزستورات بزاوية مقدارها $(120°)$، حيث تقدح الترانزستورات تباعاً بزاوية مقدارها $(60°)$ كما يبين الشكل (٧-٢٠) إشارات قدح الترانزستورات الستة وفترات التوصيل لكلٍ منها.



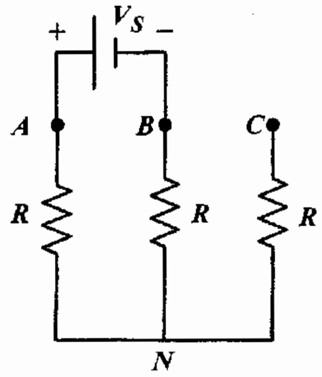
الشكل (٧- ٢٠)

إشارات قدح الترانزستورات الستة

يكون هنالك ترانزستورين موصولين في وقتٍ واحد، الأول في المجموعة الموجبة $(Q_1, Q_3, and\ Q_5)$ والثاني من المجموعة السالبة $(Q_2, Q_4, and\ Q_6)$ على التوالي. ويكون التتابع $(Q_6Q_1, Q_1Q_2, Q_2Q_3, Q_3Q_4, Q_4Q_5, Q_5Q_6)$.

خلال نصف الدورة هنالك ثلاثة أوضاع للعمل في العاكسات ثلاثية الأطوار. والدوائر المكافئة لهذه الأوضاع مبينة حسب الأشكال في كل وضع لوحده:-

١- للوضع الأول:- يكون عندما $\left(0 \le \omega t \le \dfrac{\pi}{3}\right)$.



الوضع الأول

في هذه الحالة يكون:-

$$v_{AN} = \frac{V_S}{2}$$

$$v_{BN} = -\frac{V_S}{2}$$

$$v_{CN} = 0$$

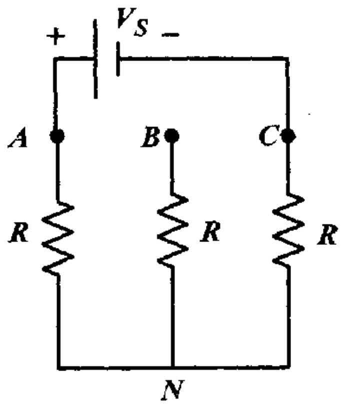
وبالتالي فإن جهود الخطوط تساوي:-

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} = \frac{V_S}{2} - \left(-\frac{V_S}{2}\right) = V_S$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} = \frac{V_S}{2} - 0 = -\frac{V_S}{2}$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} = 0 - \left(\frac{V_S}{2}\right) = -\frac{V_S}{2}$$

٢- الوضع الثاني:- يكون خلال الفترة $\left(\frac{\pi}{3} \le \omega t \le \frac{2\pi}{3}\right)$.



الوضع الثاني

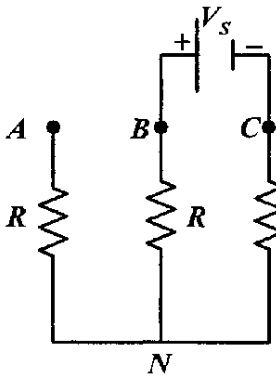
في هذه الحالة يكون:-

$$v_{AN} = \frac{V_S}{2}$$
$$v_{BN} = 0$$
$$v_{CN} = -\frac{V_S}{2}$$

وبالتالي فإن جهود الخطوط تساوي:-

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} = \frac{V_S}{2} - 0 = \frac{V_S}{2}$$
$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} = 0 - \left(-\frac{V_S}{2}\right) = \frac{V_S}{2}$$
$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} = -\left(\frac{V_S}{2}\right) - \left(\frac{V_S}{2}\right) = -V_S$$

٣- الوضع الثالث:- خلال الفترة $\left(\frac{2\pi}{3} \le \omega t \le \pi\right)$.



الوضع الثالث

في هذه الحالة يكون:-

$$v_{AN} = 0$$
$$v_{BN} = \frac{V_S}{2}$$
$$v_{CN} = -\frac{V_S}{2}$$

وبالتالي فإن جهود الخطوط تساوي:-

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} = 0 - \frac{V_S}{2} = -\frac{V_S}{2}$$
$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} = \frac{V_S}{2} - \left(-\frac{V_S}{2}\right) = V_S$$
$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} = -\left(\frac{V_S}{2}\right) - 0 = -\frac{V_S}{2}$$

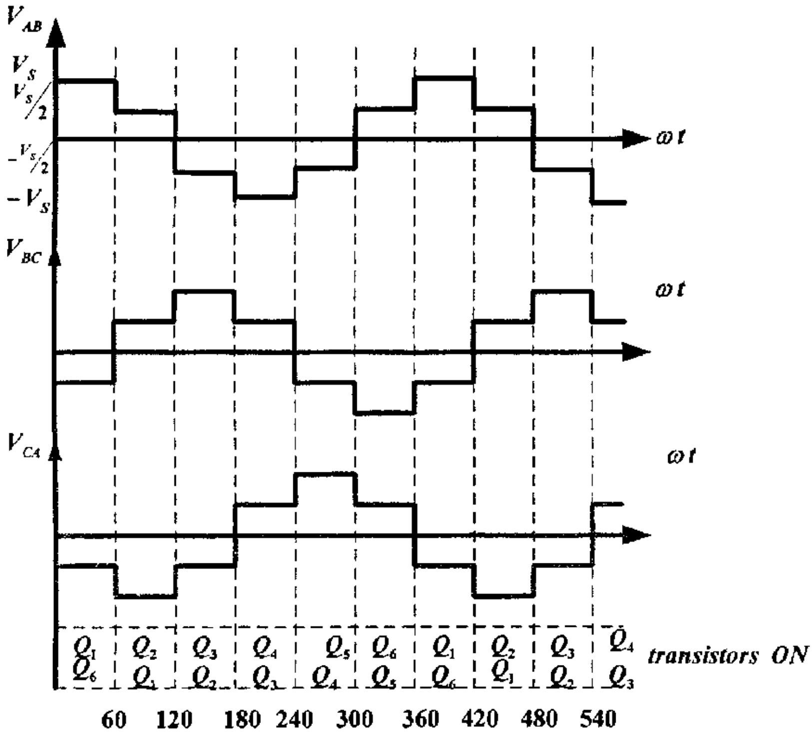
الدوائر المكافئة للوضعيات (4,5,6) يمكن الحصول عليها بعكس قطبية فولطية المصدر للوضعيات (1,2,3) على التوالي. جهد الطور $\left(V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}\right)$ وجهد الخط $\left(V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}\right)$ في حالة توصيل الحمل على شكل نجمي يعطى بالجدول رقم (٣).

الفترة	توصيل الترانزستورات	جهد الطور			جهد الخط		
		V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}
$0^o - 60^o$	Q_6, Q_1	$\frac{V_S}{2}$	$-\frac{V_S}{2}$	0	V	$-\frac{V_S}{2}$	$-\frac{V_S}{2}$
$60^o - 120^o$	Q_1, Q_2	$\frac{V_S}{2}$	0	$-\frac{V_S}{2}$	$\frac{V_S}{2}$	$\frac{V_S}{2}$	$-V$
$120^o - 180^o$	Q_2, Q_3	0	$\frac{V_S}{2}$	$-\frac{V_S}{2}$	$-\frac{V_S}{2}$	V	$-\frac{V_S}{2}$
$180^o - 240^o$	Q_3, Q_4	$-\frac{V_S}{2}$	$\frac{V_S}{2}$	0	$-V$	$\frac{V_S}{2}$	$\frac{V_S}{2}$
$240^o - 300^o$	Q_4, Q_5	$-\frac{V_S}{2}$	0	$\frac{V_S}{2}$	$-\frac{V_S}{2}$	$-\frac{V_S}{2}$	V
$300^o - 360^o$	Q_5, Q_6	0	$-\frac{V_S}{2}$	$\frac{V_S}{2}$	$\frac{V_S}{2}$	$-V$	$\frac{V_S}{2}$

الجدول رقم (٣)

حالة التوصيل للترانزستورات وجهود الخط والطور

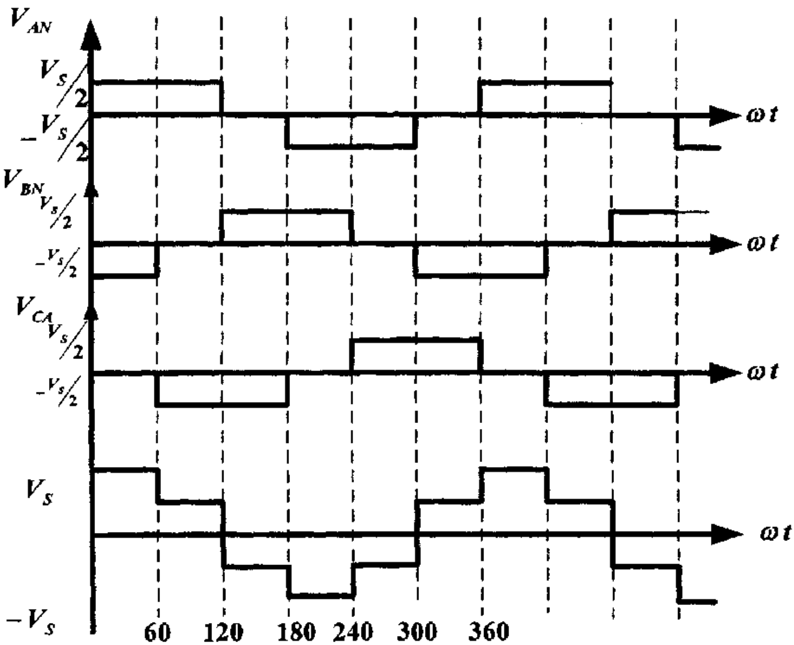
وتكون أشكال الجهود الخطية للعاكس ثلاثي الطور في حالة التوصيل النجمي عند فترة التوصيل (120^o) موجودة في الشكل (٧-٢١).



الشكل (٧-٢١)

أشكال الجهود الخطية للعاكس ثلاثي الطور في حالة التوصيل النجمي عند فترة التوصيل (120^o)

وأشكال جهود الطور مبينة في الشكل (٧-٢٢).



الشكل (٧-٢٢)

أشكال جهود الطور للعاكس ثلاثي الطور في حالة التوصيل النجمي عند فترة التوصيل (120^o)

وباستخدام تحليلات فورير يمكن الحصول على فولطيات الخط من العلاقات:-

$$V_{AN} = \sum_{n=2K+1}^{\infty} \frac{2V_S}{n\pi} Cos\frac{n\pi}{6} Sin\left(n\,\omega t + \frac{n\pi}{6}\right) \qquad (7.33)$$

$$V_{BN} = \sum_{n=2K+1}^{\infty} \frac{2V_S}{n\pi} Cos\frac{n\pi}{6} Sin\left(n\,\omega t - \frac{n\pi}{2}\right) \qquad (7.34)$$

$$V_{CN} = \sum_{n=2K+1}^{\infty} \frac{2V_S}{n\pi} Cos\frac{n\pi}{6} Sin\left(n\,\omega t + \frac{5n\pi}{6}\right) \qquad (7.35)$$

حيث أن:- $(K = 1,2,3,......)$

والقيمة الفعالة الأساسية لجهد الطور تعطى بالعلاقة:-

$$V_{ph1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2V_S}{\pi} Cos \frac{\pi}{6} \frac{V_S}{} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}\ \pi} V_S = 0.39\ V_S \qquad (7.36)$$

والقيمة الفعالة الأساسية لجهد الخط تعطى بالعلاقة:-

$$V_{L1} = \sqrt{3}\ V_{ph1} = \frac{3\ V_S}{\sqrt{2}\ \pi} = 0.675\ V_S \qquad (7.37)$$

القيمة الفعالة لجهد الطور تساوي:-

$$V_{ph} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} \left(\frac{V_S}{2} \right)^2 \ d\left(\omega t\right)} = \frac{V_S}{\sqrt{6}} = 0.408\ V_S \qquad (7.38)$$

القيمة الفعالة لجهد الخط تعطى بالعلاقة:-

$$V_L = \sqrt{3}\ V_{ph} = 0.707 V_S \qquad (7.39)$$

القدرة على مخرج العاكس تساوي:-

$$P_L = 3 \frac{V_{ph}^2}{R} = \frac{V^2}{2R} \qquad (7.40)$$

القيمة الفعالة للتيار من العلاقة:-

$$I_{Q(rms)} = \frac{I_{ph}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{ph}/R}{\sqrt{2}} = \frac{V_S}{2\sqrt{3}R} \qquad (7.41)$$

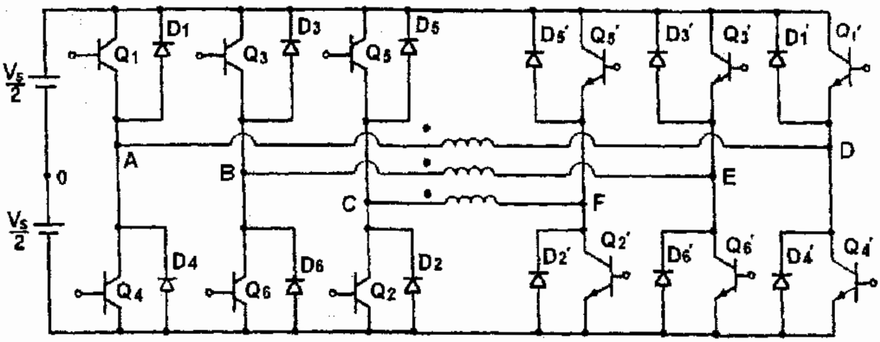
قدرة الحمل تساوي:-

$$P_L = 3I_{ph}^2\ R = 6\ I_{Q(rms)} R \qquad (7.42)$$

٧-٣-٢- العاكسات ثلاثية الأطوار الجسرية

Three-Phase Bridge Inverters

الشكل (٧-٢٣) يبين الدائرة لهذا النوع من العاكسات.



الشكل (٧-٢٣)
عاكس ثلاثي الأطوار الجسري

في هذه العاكسات يتم استخدام **(12)** ثايروستور و**(12)** ديود، ويمكن أن يوصل الحمل معها بشكل مثلي أو نجمي.

مثال (٧-٣):- عاكس ثلاثي الأطوار يغذى من مصدر للجهد $(V = 600V)$، يعمل العاكس في نمط التشغيل $(180°)$. ويغذي حمل مادي على شكل نجمي $(R = 15\ \Omega)$لكل طور. أوجد:-

١- القيمة الفعالة لتيار الخرج.

٢- القيمة الفعالة لتيار العنصر شبة الموصل.

٣- القدرة المزودة للحمل.

٤- القيمة المتوسطة لتيار المصدر.

الحل:-

القيمة الفعالة لفولتية الأطوار هي:

$$V_{ph} = \frac{\sqrt{2}}{3}V = \frac{\sqrt{2}}{3}600 = 282.84\ V$$

أذن فإن القيمة الفعالة لتيار الحمل تكون:-

$$I_{ph} = \frac{V_{ph}}{R} = \frac{282.84}{15} = 18.85\ A$$

القيمة الفعالة لتيار العنصر شبة الموصل تساوي:-

$$I_{S(Switch)} = \frac{V}{3R} = \frac{600}{3\times 15} = 13.33\ A$$

القدرة المزودة للحمل:-

$$P = 3\frac{V_{ph}^2}{R} = 3\frac{282.84^2}{15} = 1599\ W\ \ or\ 16KW$$

القيمة المتوسطة لتيار المصدر:-

قدرة المصدر تساوي $\left(P_S = V_L.I_{av} = P_L\right)$ ومنها يمكن إيجاد قيمة التيار وهي:-

$$I_{av} = \frac{P_L}{V_L} = \frac{15999}{600} = 26.66\ A$$

٧-٤- التحكم بجهد العاكس في العاكسات أحادية الطور

Voltage Control of Single- Phase Inverters

في كثير من التطبيقات الصناعية فانه لابد من التحكم بالجهد الخارج من العاكس من أجل:-

١- موافقة متطلبات جهد الدخل (DC).

٢- تنظيم جهد العاكس.

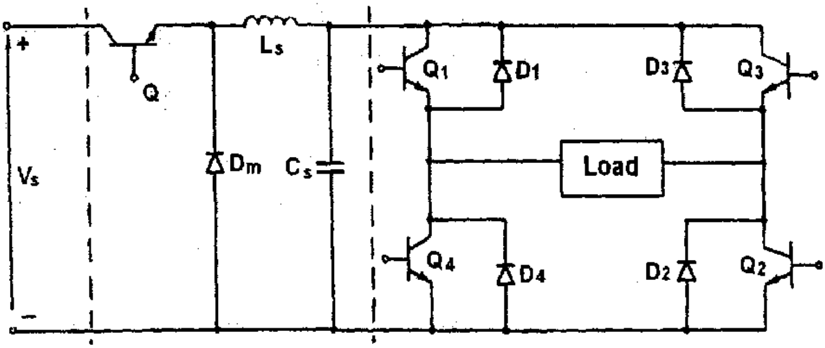
٣- أن تكون نسبة تغير الجهد إلى التردد ثابتة.

يمكن استخدام عدة طرق من اجل التحكم بجهد الخرج للعاكسات، ويمكن تصنيف هذه الطرق ضمن الأصناف الرئيسية التالية:-

١- التحكم بجهد المدخل المستمر المطبق على العاكس:- ويتم ذلك بإحدى الطرق التالية:-

أ- يتم باختيار مصدر جهد مستمر متغير القيمة، بحيث يتم تطبيق جهد معين على مدخل العاكس من اجل الحصول على جهد معين على مخرج العاكس.

ب- يتم باضافة دوائر تقويم باستخدام الديودات أو الثايروستورات. إذا كان المطلوب الحصول على جهد (Ac) متغير على مخرج العاكس، وهذا النوع من العاكسات يدعى بـ (Variable dc link Inverter) والشكل (٧-٢٤) يبين الدائرة المستخدمة لهذا النوع من العاكسات.



الشكل (٧-٢٤)

العاكس موصول مع مصدر تيار مباشر متغير

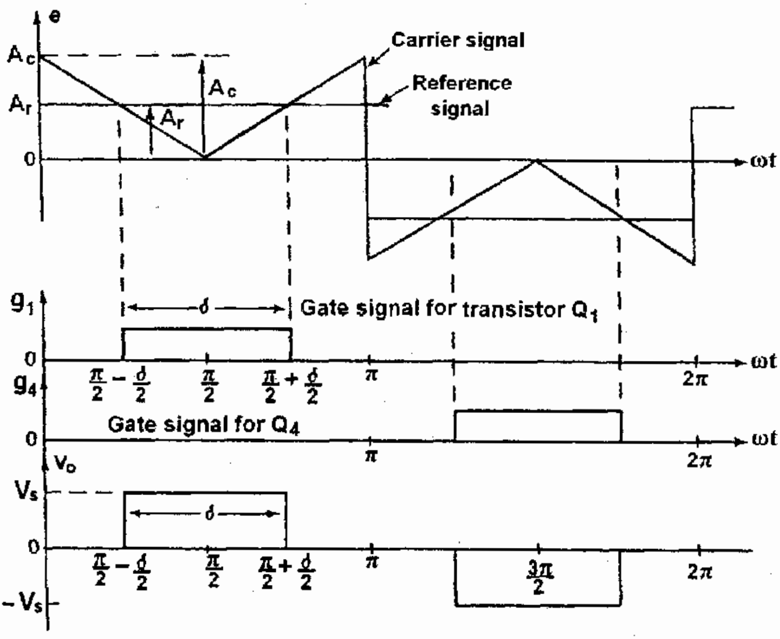
٢- التحكم بجهد الخرج المتناوب للعاكس:- يتم ذلك بإضافة منظم جهد بين خرج العاكس والحمل.

٣- التحكم بالجهد خلال العاكس:- ويستخدم لهذه الغاية التحكم بعرض النبضة (PWM)، حيث يتم التحكم بجهد الخرج عن طريق تغيير فترة التوصيل لنبضات موجة الخرج. وهنالك عدة أنواع من نوع التحكم بعرض النبضة من أهمها:-

٧-٤-١- التحكم بعرض نبضة واحدة

Single Puluse-Width-Moudlation

في هذا النوع من التحكم بعرض النبضة، يتم التحكم بعرض نبضة واحدة خلال نصف الزمن الدوري (نصف الدورة) وعرض الموجة يتم تغييرة من اجل التحكم في جهد الخرج للعاكس. الشكل (٧-٢٥) يبين آلية هذا النوع من التحكم ويبين شكل النبضات من اجل التحكم بجهد الخرج لعاكس أحادى الطور جسري.



الشكل (٧-٢٥)

شكل النبضات من اجل التحكم بجهد الخرج لعاكس أحادى الطور جسري

يتم الحصول على إشارة البوابة في هذا التحكم وذلك بمقارنة موجة مرجعية مربعة بقيمة (A_r) مع موجة مثلثيه بقيمة (A_c). تردد الموجة المثلثية يحدد التردد الأساسي لموجة الخرج. بتغير الموجة المرجعية (A_r) من (A_r) الى الصفر، فإن

عرض النبضة يتغير من $(180°)$ الى $(0°)$. وتعرف النسبة بين $\left(\frac{A_r}{A_c}\right)$ بمعامل التحكم (M) (Modulation Index).

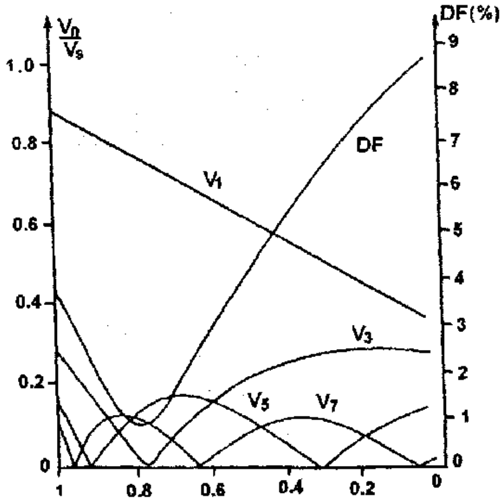
$$M = \frac{A_r}{A_c} \qquad (7.43)$$

القيمة الفعالة للجهد تساوي:-

$$V_{rms} = V_S \sqrt{\frac{\sigma}{\pi}} \qquad (7.44)$$

حيث أن (σ):- عرض النبضة.

هذه الوسيلة من التحكم ينتج عنها توافقيات متعددة وتردد هذه التوافقيات تجعلنا نحصل على جهد خرج منخفض. والشكل (٧-٢٦) يبين علاقة معامل التحكم مع التوافقيات.



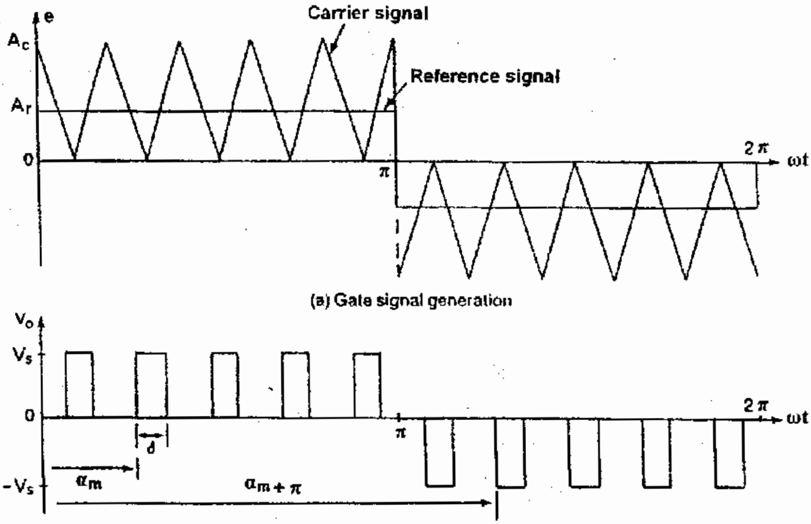
الشكل (٧-٢٦)

علاقة معامل التحكم مع التوافقيات

٧-٤-٢- التحكم بعرض النبضة باستخدام نبضات متعددة

Multiple-Pulse-Width Modulation

في هذا النوع من التحكم يتم تخفيض التوافقيات التي تظهر في موجة الخرج. باستخدام مجموعة من النبضات في كل نصف موجة لجهد الخرج. ويتم توليد إشارات البوابة المبينة في الشكل (٧-٢٧)، وذلك بمقارنة الموجة المثلثية مع الموجة المربعة.



الشكل (٧-٢٧)

إشارات المخرج لفصل وتوصيل الترانزستور وتوليد إشارات البوابة

يتم التحكم بتردد الخرج (f_o)عن طريق تردد الموجة المرجعية، وعدد النبضات (P) خلال نصف دورة يتم تحديده عن طريق تردد الموجة المثلثية (f_c). وهذه الوسيلة من التحكم تدعى (Uniform Pulse-Width-Modulation) .(UPWM)

عدد النبضات خلال نصف الدورة تحسب من العلاقة:-

$$P=\frac{f_C}{2f_o}=\frac{m_f}{2}=\frac{f_C/f_o}{2} \qquad (7.45)$$

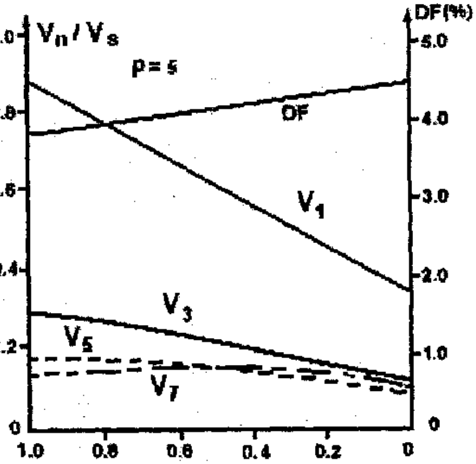
حيث أن (m_f) :- نسبة تعديل التردد

بتغيير معامل التحكم (M) من $(1 \Rightarrow 0)$، يتم التحكم بعرض النبضة من $\left(0 \Rightarrow \frac{\pi}{P}\right)$ وبجهد الخرج من $(0 \Rightarrow V_S)$.

إذا كانت (σ) هي عرض كل نبضة فإن القيمة الفعالة للجهد تساوي:-

$$V_{rms}=V_S\sqrt{\frac{P.\sigma}{\pi}} \qquad (7.46)$$

الشكل (٧-٢٨) يبين علاقة التوافقيات مع تغير معامل التحكم (M) من اجل خمسة نبضات لنصف الموجة.



الشكل (٧-٢٨)

علاقة التوافقيات مع تغير معامل التحكم

ترتيب التوافقيات في هذا النوع من التحكم هو نفسه كما هو الحال في استخدام التحكم في عرض نبضة واحدة. ولكن معامل التشويش في هذا النوع من التحكم اقل منة في حالة النبضة الواحدة. ونتيجة لوجود عدد كبير من عمليات الفصل والوصل للترانزوستورات في هذا النوع من التحكم، فإن المفاقيد الناتجة عن عملية الفصل والوصل سوف تزداد. ومن اجل عدد كبير من النبضات (P) فإن قيمة التوافقيات الدنيا سوف تقل، ولكن قيمة بعض التوافقيات المرتفعة سوف تزداد. ويمكن التخلص من هذه التوافقيات بسهولة وذلك باستخدام المرشحات.

٧-٤-٣- التحكم بعرض الموجة الجيبية

Sinusoidal Pulse-Width-Modulation (SPWM)

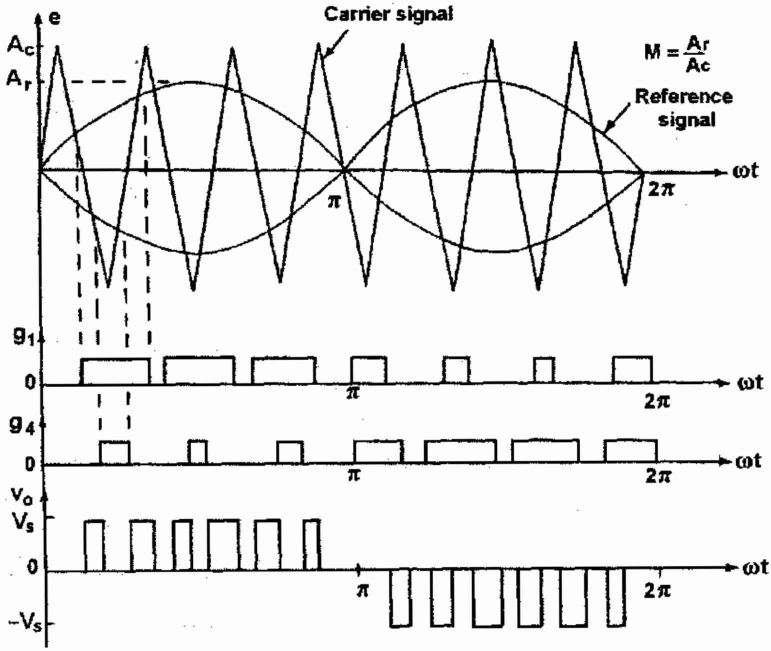
في هذا النوع من التحكم تكون الإشارة المرجعية هي موجة جيبيه، ويتم التحكم بعرض كل نبضة بالنسبة إلى قيمة الموجة الجيبية. بحيث يتم التحكم بعرض الموجة بالنسبة لمركز النبضة. ويتم في هذا النوع من التحكم تخفيض معامل التشويش والتوافقيات، والشكل (٧-٢٩) يبين آلية عمل هذا النوع من التحكم.

ويتم في هذا النوع من التحكم مقارنة موجة مرجعية جيبيه الشكل مع موجة حاملة مثلثية الشكل. ويستخدم هذا النوع من التحكم في التطبيقات الصناعية .

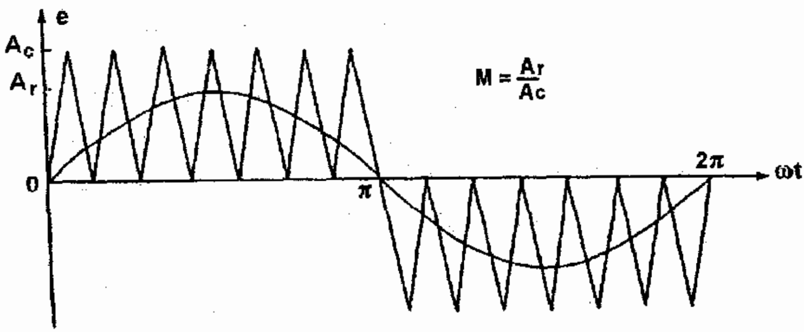
تردد الموجة المرجعية (f_r) يحدد تردد الخرج للعاكس (f_o) والقيم العظمى للموجة المرجعية (A_r) تحدد عامل التحكم (M) وتحدد القيمة الفعالة لجهد الخرج (V_R). وعدد النبضات لكل نصف موجة يعتمد على تردد الموجة الحاملة (f_c).

مع أن الترانزوستورين الموصولين في نفس الفرع لا يوصلان مع بعضهما البعض (Q_1, Q_2)، فإن جهد الخرج اللحظي يمكن مشاهدته في الشكل (٧-٢٩).

يمكن الحصول على نفس إشارة التحكم (إشارة البوابة) باستخدام موجة حاملة مثلثية ثنائية الاتجاه كما هو مبين في الشكل (٧-٣٠).



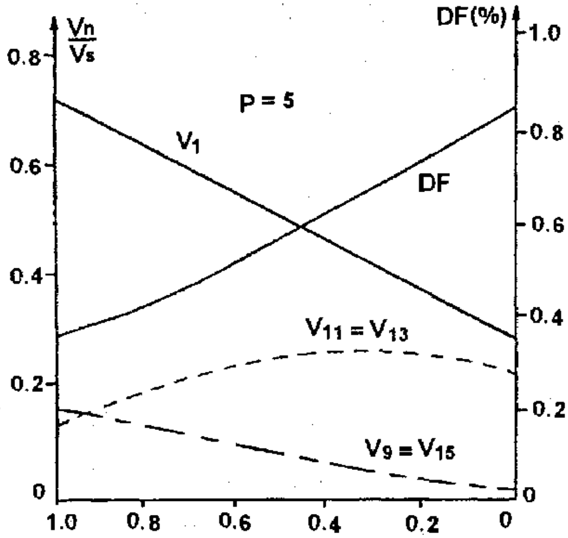
الشكل (٧-٢٩) شكل موجة الخرج اللحظية



الشكل (٧-٣٠) التحكم بعرض الموجة الجيبية.

القيمة الفعالة لجهد الخرج يمكن أن تتغير بتغيير معامل التحكم $\left(M = \frac{A_r}{A_c}\right)$.

ويمكن الملاحظة أن منطقة كل نبضة محصورة تحت الموجة الجيبية وحول مركز النبضة . والشكل (٧-٣١) يبين علاقة التوافقيات مع معامل التحكم من اجل خمسة نبضات في نصف الموجة.



الشكل (٧-٣١)

علاقة التوافقيات مع معامل التحكم

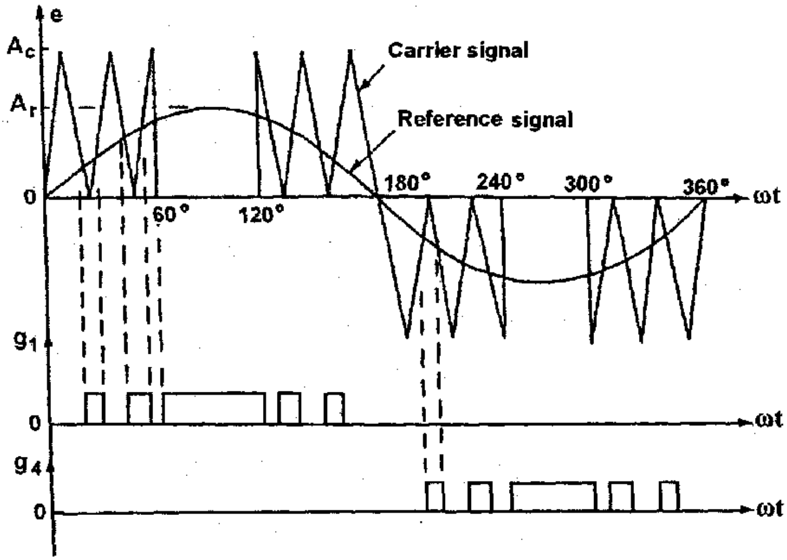
ينخفض معامل التشويش في هذا النوع من التحكم مقارنة مع معامل التشويش الناتج عن التحكم بعرض النبضة باستخدام نبضات متعددة. وفي هذا النوع من التحكم جميع التوافقيات التي تقل أو تساوي $(2P-1)$ يتم حذفها. من اجل عدد نبضات $(P=5)$ فان التوافقية الأقل هي التوافقية التاسعة.

٧-٤-٤- التحكم بعرض الموجة الجيبية المحسنة

Modified Sinusoidal-Pulse-Width-Modulation (MSPUM)

للتحكم بعرض الموجة الجيبية السابق، فإن عرض النبضات القريبة من القمم للموجة الجيبية لا تتغير بشكل دقيق مع تغير معامل التحكم. ولتحسين هذا النوع من التحكم يتم التحكم بعرض النبضة عند بداية ونهاية الموجة الجيبية. أي تطبيق الموجة الحاملة خلال الفترة الأولى والنهائية للتوصيل.

في الشكل (٧-٣٢) تم تطبيق الموجة الحاملة في الفترات $(0 \to 60),(120 \to 180)$ خلال نصف الموجة.



الشكل (٧-٣٢)

فترات تطبيق الموجة الحاملة

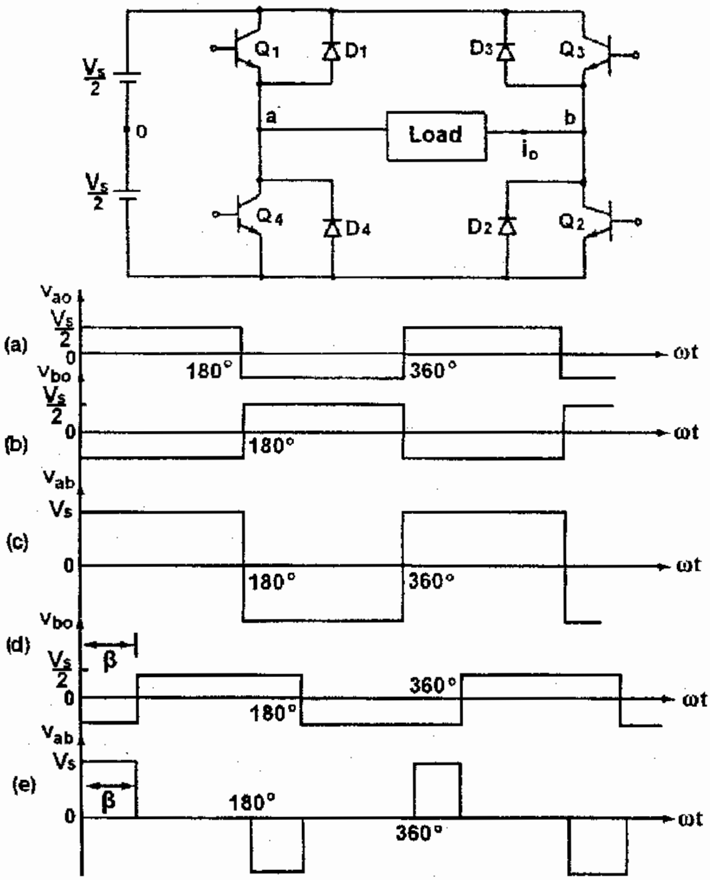
ويكون عدد النبضات (q) في فترة التوصيل (60°) معتمدا على نسبة التردد:-

$$\frac{f_c}{f_o} = 6q + 3 \qquad (7.47)$$

٧-٤-٥- التحكم بالإزاحة الطورية

Phase-Displacement Control

يمكن الحصول على التحكم بالجهد باستخدام عدد من العاكسات وجمع مخارج هذه العاكسات. كمثال العاكس أحادي الطور الجسري يمكن الحصول علية من عاكسين أحاديين الطور نصف جسري كما هو مبين بالشكل (٧-٣٣).



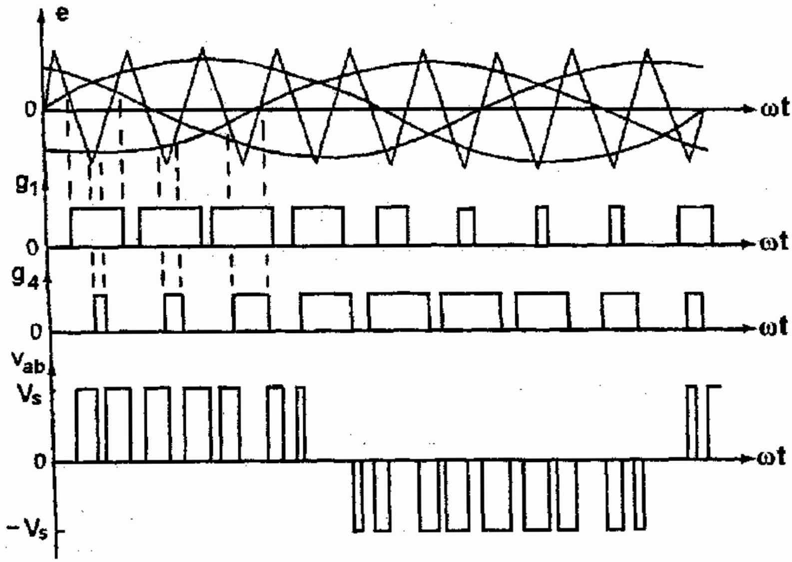
الشكل (٧-٣٣)

دائرة عاكسين نصف جسري وشكل الإشارات الخارجة

٧-٥- التحكم بجهد العاكسات ثلاثية الأطوار

Voltage Control of Three-Phase Inverters

العاكس ثلاثي الطور يمكن اعتباره ثلاثة عاكسات أحادية الطور مزاحة عن بعضها البعض بزاوية مقدارها (120°). والموجة الحاملة تقارن مع الموجة المرجعية للطور محدثة الإشارة النبضية للطور، الشكل (٧-٣٤).



الشكل (٧-٣٤)

شكل النبضات الخارج لمقارنة موجة جيبية مع موجة مرجعية

٧-٦- التخلص من التوافقيات

Harmonic Reductions

في التحكم بجهد العاكس يتم التخلص من التوافقيات من المرتبة (n) باختيار زاوية الإزاحة الطورية (β) بحيث يكون:-

$$Sin\frac{n\beta}{2}=0 \Rightarrow \beta=\frac{360^{\circ}}{n}$$

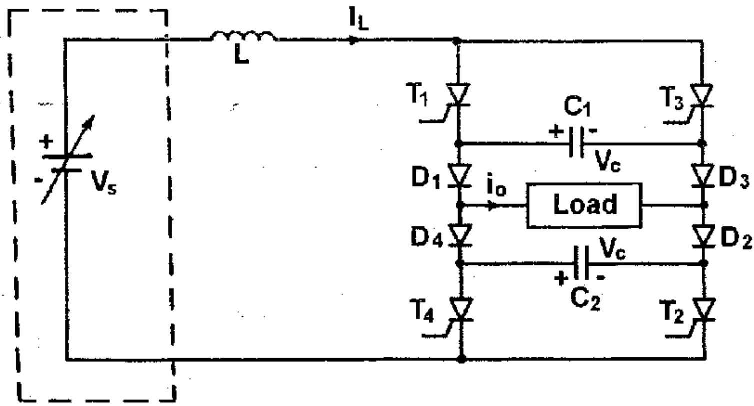
٧-٧- العاكسات ذات مصدر التيار

Current-Source Inverters

في هذا النوع من العاكسات فإن المدخل يكون ذا خصائص مصدر تيار. تيار الخرج لحمل العاكس يحافظ عليه ليبقى ثابتاً بينما جهد الخرج يجبر على التغير. ويتم ذلك بإضافة ملف كبير القيمة على التوالي مع مصدر جهد التغذية المستمر.

ويقسم هذا النوع من العاكسات إلى قسمين أساسيين:-

١- العاكس ذو مصدر التيار الجسري أحادي الطور (Single-Phase Current Source Bridge Inverter):- الشكل (٧-٣٥) يبين الدائرة لهذا النوع من العاكسات.



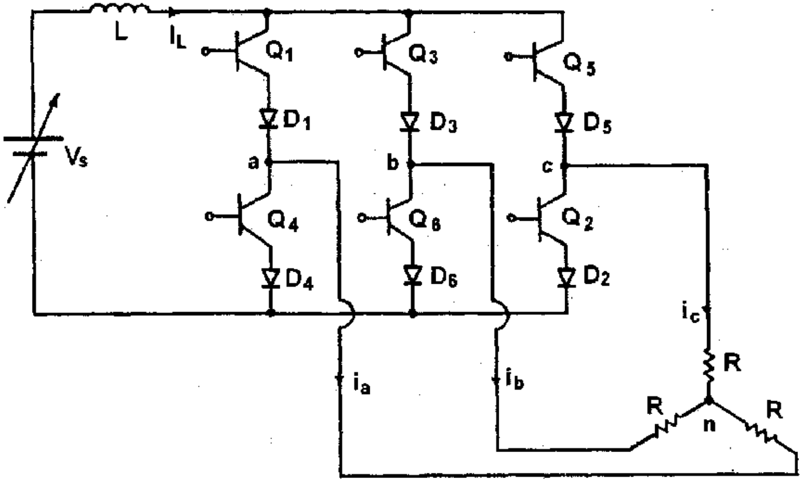
الشكل (٧-٣٥)

العاكس ذو مصدر التيار الجسري أحادي الطور

في هذا العاكس الثايروستوران (T_1,T_2) يوصلان معا وكذلك الثايروستوران (T_3,T_4) يوصلان مع بعضهما، وكل منهما يوصل لفترة (180°).

٢- العاكس ذو مصدر التيار ثلاثي الطور Three-Phase Current Source Inverter

الشكل (٧-٣٦) يبين تركيب هذا النوع من العاكسات.



الشكل (٧-٣٦)

العاكس ذو مصدر التيار ثلاثي الطور

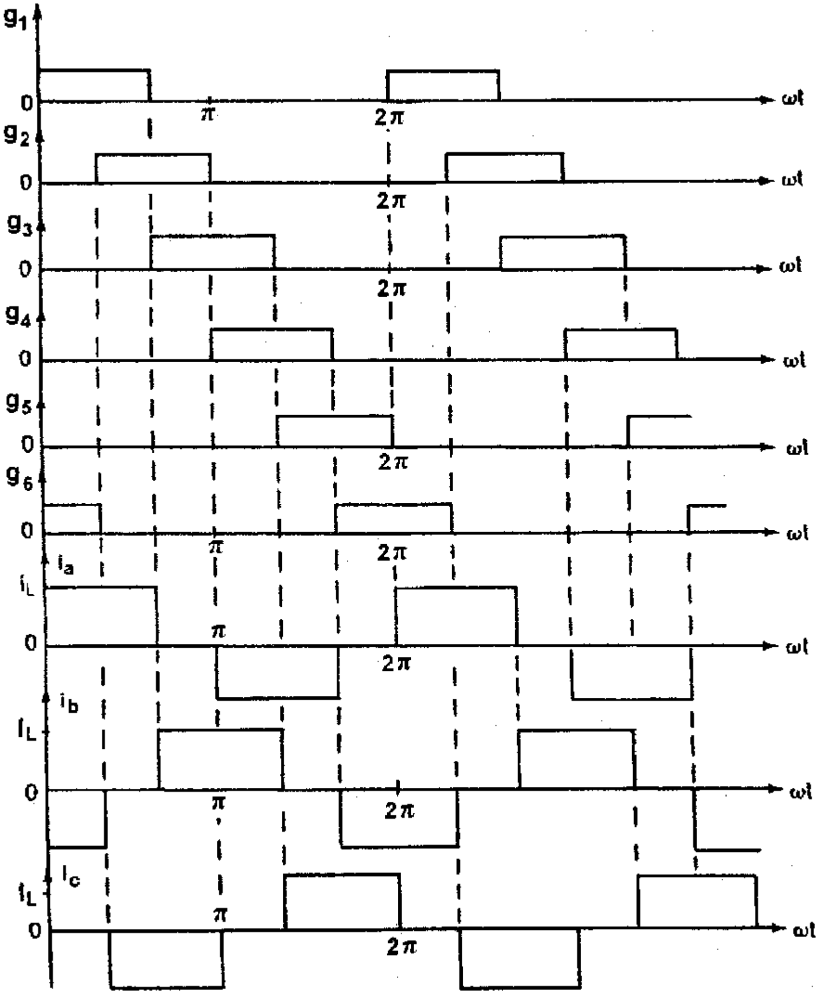
والشكل (٧-٣٧) يبين شكل موجة الحمل للعاكس ذي مصدر التيار ثلاثي الطور.

ولتصميم دوائر العاكسات بشكل عام:-

١- يجب معرفة شكل موجة الخرج المطلوبة وبالتالي اختيار نوع العاكس المناسب.

٢- العمل على التقليل من التوافقيات باستخدام المرشحات المناسبة.

٣- تحديد جهود الانحياز العكسي والتيارات للعناصر المستخدمة.



الشكل (٧-٣٧)

يبين شكل موجة الحمل للعاكس ذي مصدر التيار ثلاثي الطور

الوحدة الثامنة

المفاتيح الاستاتية

الوحدة الثامنة

المفاتيح الاستاتية

Static Switches

أن أهمية معظم أنظمة التحكم تكمن في التحكم بالقـدرة الكهربائيـة الـى المشغل (Actuator) والذي يكون في العاده المحرك الكهربائي عن طريق الحاكم. وحيث أن الإشارة الكهربائية الخارجة من الحاكم تكون صغيرة ولا يمكـن عـن طريقها قيادة الحمل بشكل مباشر فلا بد من تكبير هذه الإشارة بأية طريقة.

هنالك ثلاث تصنيفات للعناصر التي تستخدم في التحكم بالقدرة الكهربائية:-

١- الاجهزة الكهروميكانيكية مثل المفاتيح الكهربائية والمرحلات.

٢- ترانزستورات القدرة مثل ترانزستور تأثيري المجال

٣- [illegible] التي تسمى [illegible]

الثايرستور والترياك

وجميع هذه العناصر موضوع البحث هذا الفصل.

٨-١- الاجهزة الكهروميكانيكية

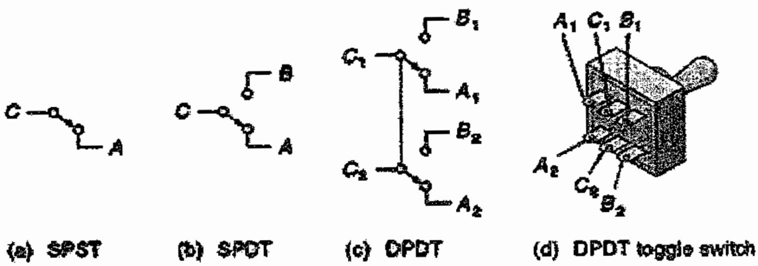
٨-١-١- المفاتيح الكهربائية Electrical Switches

المفتاح الميكانيكي جهاز يمكن ان يكون مفتوحاً او مغلقاً، وبالتالي يـسمح للتيار الكهربائي بالعبور أو لا يسمح. كما هو ملاحظ دون ادنا شك ان المفاتيح لها احجام وأشكال وتراكيب مختلفة.

٨-١-١-١- المفتاح المفصلي الكهربائي Toggly Switches

المفتاح المفصلي الكهربائي من أكثر المفاتيح شيوعا. حيث يتوفر بتراكيب تماسات مختلفة. كل مفتاح يحتوي على قطب او عدة اقطاب. بحيث يكون كل قطب فيه يعمل بشكل مفتاح مستقل.

تراكيب تماسات المفتاح المفصلي:- تماسات المفتاح المفصلي أما أن تكون ذا قطب واحد- رمية واحدة (Single- pole/single- Tthrow) كما يظهر في الشكل (٨-١-a). ويرمز له باختصار (SPST). هذا القطب إما أن يكون مفتوحا او مغلقا.وهذا التركيب يعد أبسط تركيب.



الشكل (٨-١)

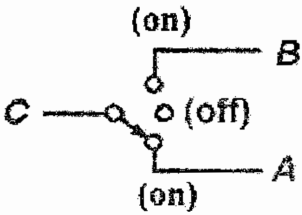
تركيب التماسات للمفتاح المفصلي

وإذا ارتفعنا بالتعقيد قليلا فاننا نجد المفتاح ذو القطب الواحد- الرمية المضاعفة (SPDT) (Single-pole/ double Throw Switch) الموضح في الشكل (٨-١-b) الطرف المتحرك يدعى المشترك (C) (Common)، او الماسحة، ويمكن ان يوصل مع التماس (A) او التماس (B).

يبين الشكل (٨-١-C) المفتاح ذو القطب المضاعف - الرمية المضاعف (Double-pole/double (DPBT) Throw switch)، والذي يحتوي على اثنين من المفاتيح الكهربائية (SPDT) المنفصلة في بيت واحد يعملان مع بعضهما. أما الشكل (٨-١-d) فيبين ترتيب أطراف التوصيل في الجهة الخلفية لجسم المفتاح المفصلي و أطراف التوصل الثلاثة لكل قطب، يتوفر من هذا المفتاح تراكيب تصل الى ستة اقطاب.

فيما سبق الى حد ما كان مدار البحث مركزا على المفتاح ذا الوضعين (Two-Position Switch) والذي يأتينا في تراكيب: الشكل البسيط (٨-١-a) فصل-وصل $(On-Off)$ أو الشكل (٨-١-b) وصل- وصل $(On-On)$.

المفتاح ذو الثلاثة أوضاع ويدعى وصل- فصل- وصل $(On-Off-On)$ له وضع ثابت في المنتصف عندما يكون الطرف (C) غير موصول مع الطرف (A) او الطرف (B) كما هو واضح في الشكل (٨-٢).



الشكل (٨-٢)

المفتاح ذو الثلاثة أوضاع

هنالك مفاتيح مفصلية بوضعية واحدة أو أكثر ويثبت فيها الوضع عن طريق زنبرك، ويعني ذلك يجب ان يكون الضغط موجوداً حتى يبقى المفتاح في وضعه. ان هذه المفاتيح تدعى مفاتيح التوصيل الآنية (Momentary-Contact Switches). مثال على ذلك مفتاح التشغيل في السيارة، والذي يجب ان تستمر فيه بالضغط على المفتاح حتى يقوم بتشغيل المحرك.

الجدول (٨-١) يبين الاحتمالات المختلفة للطراز الدقيق للمفتاح المفصلي. على سبيل المثال المفتاح الثالث $(1SFX191)$ يكون له ثلاث اوضاع بوضع فصل- وصل لحظي.

Typical Toggle Switches*

Type	Number of poles	Circuit
1SBX191	1	On–Off–On
1SCY191	1	On On
1SFX191	1	On–Off–On†
1SGX191	1	On On†
1SHX191	1	On†–Off–On†
2SBX191	2	On–Off–On
2SCY191	2	On On
2SFX191	2	On–Off–On†
2SGX191	2	On On†
2SHX191	2	On†–Off–On†
3SBX191	3	On–Off–On
3SCY191	3	On On
3SFX191	3	On–Off–On†
3SCX191	3	On On†
3SHX191	3	On†–Off–On†
4SGX191	4	On–Off–On
4SCY191	4	On On
4SFX191	4	On–Off–On†
4SGX191	4	On On†
4SHX191	4	On†–Off–On†

*Rated 5 A at 125 Vac; 5 A at 28 Vdc.
†Momentary contact.

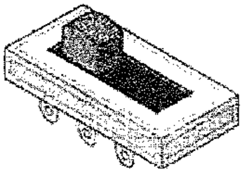
الجدول (٨-١)

الاحتمالات المختلفة لتطراز الدقيق للمفتاح المفصلي

المفتاح المفصلي له تيار وفولتية عظمى اسمية للتشغيل على (AC) او (DC). المفتاح المفصلي له فولتية للتشغيل على (DC) أقل من التشغيل على (AC) عند نفس التيار الاسمي، على سبيل المثال مفتاح له فولتيه أسمية (125 Vac) وتيار أسمي (5 A)، أو فولتية (28 Vdc) وتيار (5 A)، والسبب في ذلك يعود الى أن القوس الكهربائي الذي يمر عبر التماس يؤدي الى حرق أو حفر وجه التماس. القوس الكهربائي يكون في حالة (AC) أقل منه في حالة (DC) عند نفس الفولتية بسبب أن موجة جهد (AC) تذهب الى (0V) مرتان خلال الزمن الدوري الواحد.

٨-١-١-٢- المفتاح الانزلاقي Slide-Switch

الشكل (٨-٣) يبين المفتاح الانزلاقي، حيث يوجد هنالك فرق في التركيب الداخلي له عن المفتاح المفصلي. يؤدي المفتاح الانزلاقي نفس الوظيفة التي يؤديها المفتاح المفصلي، ومتوفر بنفس تراكيبه، وهو أقل كلفة ولكن لا يتوفر منه أنـــواع عند التيارات الاسمية العالية كما في المفتاح المفصلي.



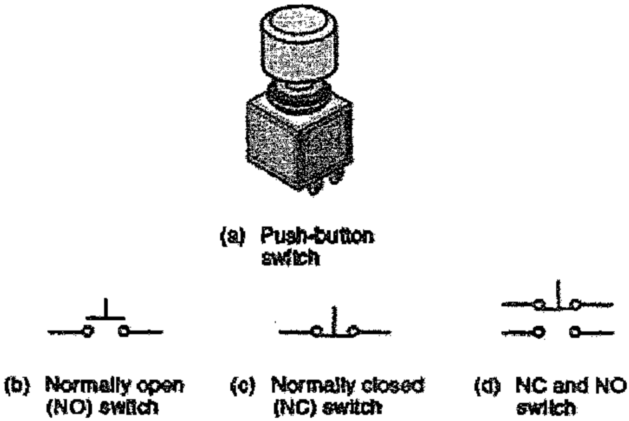
الشكل (٨-٣)
المفتاح الانزلاقي

٨-١-١-٣- المفاتيح زر- الضغط Bush-button Switches (PB)

الشكل (٨-٤-a) يبين المفتاح (PB)، حيث يكون من النوع الآنـــي اي أن الضغط يجب ان يكون موجودا حتى يبقى المفتاح مفعلا. الشكل (٨-٤-a) والشكل (٨-٤-b) والشكل (٨-٤-C) يبين رموز المفتاح (PB).

هنالك نوعان من التراكيب الممكنة للمفتاح (PB):-

اولا: المفتاح ذو التماس الطبيعي المفتوح Normally Open Contact (NO)، ثانيـــا: المفتاح ذو التماس الطبيعي مغلق Normally Closed Contact (NC)، المفتاح (NO) يبقى بشكل طبيعي مفتوح حتى نضغط على الزر فيغير وضعه، اما المفتاح (NC) يبقى تماسه بشكل طبيعي مغلق حتى نضغط على الزر فيتحول الى حالة الفتح.

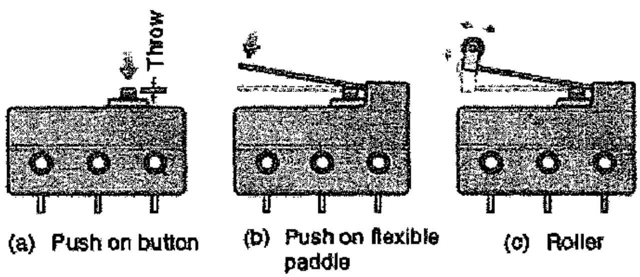


الشكل (٨-٤)

المفاتيح زر- الضغط

٨-١-١-٤- المفتاح الحدي Limit switch (LS)

المفتاح الحدي هومفتاح (PB) يوضع في مكان ما ليتم تفعيله بوساطة اتصالة مع جسم متحرك، مثال على ذلك مفتاح باب السيارة، والذي يتحسس اذا ما كان الباب مفتوحلا ام لا.



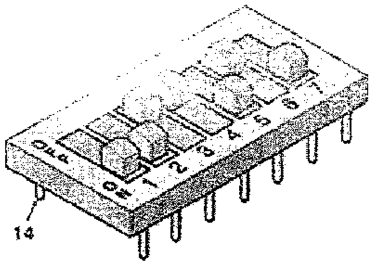
الشكل (٨-٥)

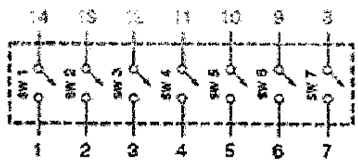
المفتاح الحدي

المفتاح الحدي متوفر بأنواع مختلفة من المشغلات مثل العنفة (Paddle) او البكـرة (Roller). غالبا هذه المشغلات تثبت على جسم المفتاح بحجم معياري صغير يدعى ميكروسوتش (Microswitch). الميكروسوتش يحتاج الى رمية صغيرة جدا بـضع الاف من الانش. الشكل (٨-٥) يبين بعض الامثلة على المفاتيح الحدية.

٨-١-١-٥- مفتاح التجميعي DIP Switch

عبارة عن تجميعة من المفاتيح من نوع (SPST) تبنى في وحدة مـشابهة للدائرة التكاملية (IC)، وتعني (DIP) تجميعة مفاتيح ثنائية بنفـس الاتـجاه (Dual In line Package). يمكن وضع المفتاح (DIP) على سوكة دائـرة تكامليـة (IC) كما هو مبين في الشكل (٨-٦).





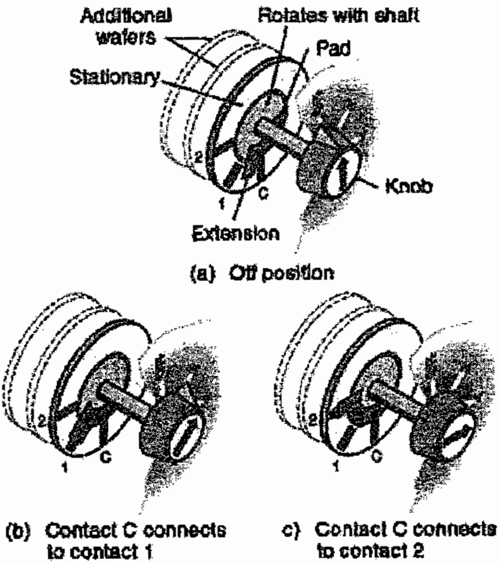
الشكل (٨-٦)
مفتاح التجميعي

كل مفتاح فردي له طرفا توصيل متقابلان، مثلاً المفتاح واحد يستخدم الطرفان (١) و (١٤)، أما المفتاح الثاني يستخدم الطرفان (٢) و(١٣) وهكذا.

٨-١-١-٦- المفتاح الدوار Rotary Switch

كما يظهر في الشكل (٨-٧) فإن المفتاح الدوار يتركب من رقاقـات مـن المفاتيح مثبتة على طول محور الدوران، الجزء الداخلي لكل رقاقة يدور في خطوة واحدة، بينما الجزء الخارجي يبقى ثابتا، ولفهم آلية عمل هذا المفتاح ننظـر إلـى

الشكل (٨-٧-a) في هذا الوضع يكون المفتاح في حالة فصل ، والطرف (C) يكون في حالة وصل مع الحشوة (pad)، لكن الحشوة لا تلامس اي من الاطراف (١) او (٢). اما في الشكل (٨-٧-b) فقد تم ادارة محور الدوران خطوة واحدة مع عقارب الساعة الى الموقع (X) ، مع العلم بأن الطرف (C) مازال موصول مع الحشوة الا أن الجزء الخارجي للحشوة عمل على توصيل الطرف (C) مع الطرف (١)، اما في الشكل (٨-٧-c) فقد تم ادارة محور الدوران الى الموقع (Y) الذي يكون فيه الطرف (C) موصولا مع الطرف (٢).

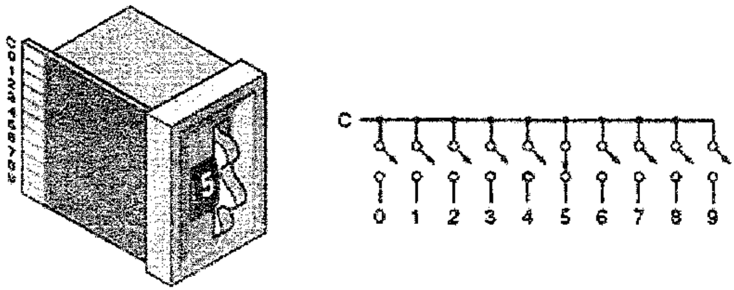


الشكل (٨-٧)

المفتاح الدوار

٨-١-١-٧- المفتاح ذو العجلة المفرزة Thumbwheel Switch

وهو نوع خاص من المفاتيح الدوارة يستخدم في إدخال البيانات الرقميــة. يقوم المشغل باختيار الرقم وذلك بادارة عجلة الارقام كما في الشكل (٨-٨)، وكل رقم يخص وضع معين للمفاتيح. من خلال الرسم التخطيطي للمفاتيح والمبينة فــي الشكل (٨-٨-b) يتضح أن طرف واحد من عشرة أطراف منفصلة يوصـــل مــع الطرف (C).



(a) Switch body

(b) Thumbwheel switch schematic

الشكل (٨-٨)

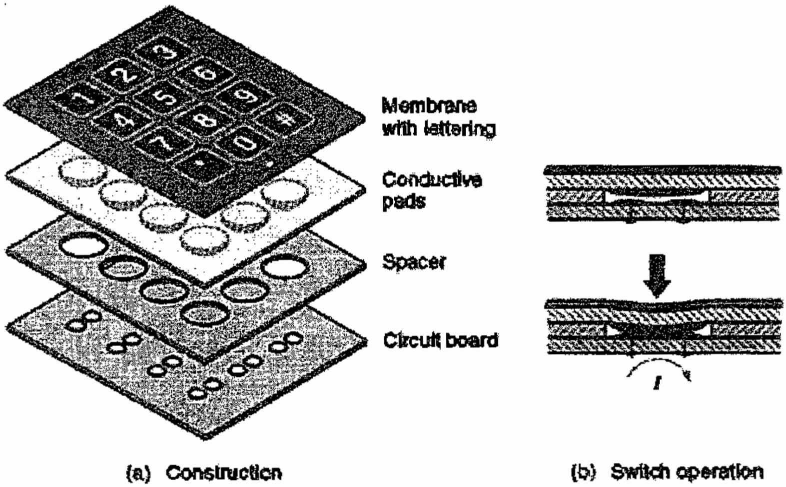
المفتاح ذو العجلة المفرزة

٨-١-١-٨- مفتاح غشائي Membrane switch

يستخدم هذا النوع من المفاتيح لادخال البيانات. حيث يحتوي هذا النوع من المفاتيح على عدد من المفاتيح والتي تبنى من خلال العديد من الطبقات كما يظهر في الشكل (٨-٩). طبقة الازرار تتكون من لوحة مطبوعــة مــع لبادتــان غيــر موصلتان لكل مفتاح. يوضع فوق اللوحة المطبوعة طبقة الحيز والتي بها فتحــات عند موقع كل مفتاح يلي هذه الطبقة طبقة التوصيل والتي تعمل على توصيل كــل مفتاح، ومن ثم طبقة لينة عليها ارقام المفاتيح. وبوضع هذه الطبقات فوق بعــضها البعض فانها تشكل المفتاح الغشائي والمقاوم للماء. عند الضغط على المفتاح فــإن

الطبقة الموصلة تدفع باتجاه طرف التوصيل على اللوحة المطبوعة حتى يمر التيار كما هو مبين في الشكل (٨-٩-b).

ان هذا المفتاح يكون مناسبا استخدامه في بيئة المصانع الملوثة بسبب أن تجميعة المفاتيح تحفظ في منئا عن دخول الملوثات اليها.



الشكل (٨-٩)

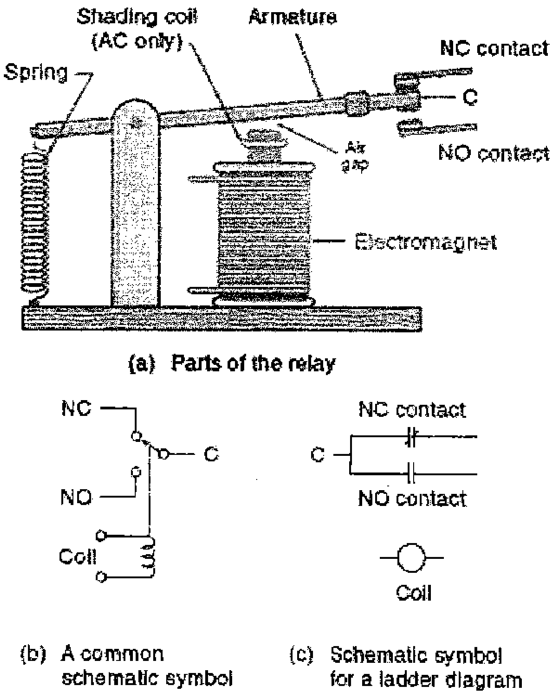
المفتاح ذو الغشاء النسيجي

٨-١-٢- المرحلات Relays

٨-١-٢-١- المرحل الكهروميكانيكي Electromechanical Relay (EMR)

المرحل الكهروميكانيكي جهاز يستخدم القوة المغناطيسية اللازمة لغلق أو فتح تماسات المفتاح، أو بعبارة أخرى مفتاح قدرة كهربائية. المخطط الذي يظهر التركيب البسيط للمرحل مبين في الشكل (٨-١٠-a) حيث يتكون من منتج (Armature) وزمبرك (Spring) وملف حجب (Shading coil) للجهد (AC) فقط

وملف كهرومغناطيسي (Electromagnet Coil) وتماسات، حيث يوجد نوعان من التماسات إحدهما مفتوح في الحالة الطبيعية (NO)، والثاني مغلق. عندما يتم تغذية الملف بمصدر جهد فإنه يعمل على دفع المنتج الى الاسفل بعكس قوة الزمبرك مؤديا الى وصل التماس (NO) مع النقطة (C) وفصل التماس (NC) عن النقطة (C)، اي يعمل على تبديل وضع التماسات.



الشكل (٨-١٠)

المرحل الكهروميكانيكي

الشكل (٨-١٠-b) يظهر الترميز الشائع للمرحل، وهذا المخطط يصف الحالة التي لا يتم فيها تغذية المرحل. اما الشكل (٨-١٠-c) يظهر ترميز المرحل في المخطط السلمي عند استخدام الحاكم المبرمج (PLC).

إن المواصفات الكهربائية للتماسات تختلف عن المواصفات الكهربائية لملف المرحل. للتماسات فان الجهد والتيار الاعظمي الذي يعمل عنده المرحل في حالة (AC) او(DC) يكون محدد. أما بالنسبة لملف المرحل تحدد قيمة الجهد والمقاومة له. ويبين الجدول (٨-٢) المواصفات الكهربائية للمرحل

Typical General-Purpose Relays*

Type	Coils		Action
	Input	Ohm	
Y1-SS1.0K	6 DC	1,000	SPDT
Y1-SS220	3 DC	220	SPDT
Y2-V52	6 DC	52	2PDT
Y2-V185	12 DC	185	2PDT
Y2-V700	24 DC	700	2PDT
Y2-Y2.5K	48 DC	2,500	2PDT
Y2.15K	115 DC	15,000	2PDT
Y4.V52	6 DC	52	4PDT
Y4-V185	12 DC	185	4PDT
Y4-V700	24 DC	700	4PDT
Y4-V2.5K	48 DC	2,500	4PDT
Y4-V15K	115 DC	15,000	4PDT
Y6-V25	6 DC	25	6PDT
Y6-V90	12 DC	90	6PDT
Y6-V430	24 DC	430	6PDT
Y6-V1.5K	48 DC	1,500	6PDT
Y5-V9.0K	115 DC	9,000	6PDT

*Contacts: 2 A typically, 3 A maximum 125 Vac of 28 Vdc.

الجدول (٨-٢)

جدول المواصفات الكهربائية للمرحل EMR

من خلال جهد ومقاومة المرحل نستطيع حساب تيار الحالة الثابتة للملف. وفي الحقيقة ان قيمة الجهد والتيار الذي يستهلكه الملف لدفع التماسات يكون اكبر

من الجهد والتيار الذي يمسك هذه التماسات لتبقى في وضعها الجديد بسبب ان المنتج يدفع باتجاه تقليل الفجوة الهوائية (Air cap)، وهذه الكميات تدعى تيار الجذب (pull-in current) وجهد الجذب (pull-in voltage). على سبيل المثال مرحل (6 V)يحتاج تماسه (2.1 V) حتى يغلق ويبقى في هذه الحالة حتى يقل الجهد الى (1 V) عندها يفتح التماس.

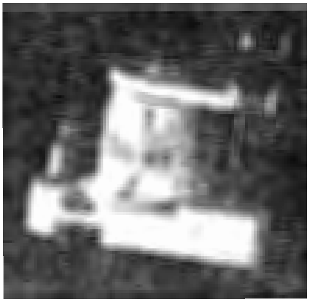
قيم التيار والجهد اللازمة ليبقى المرحل في وضعه المغذى تسمى فولتية الامساك الصغرى (Minimum Holding Voltage) وتيار التسريب (Seald Current). ان جهد الجذب يكون في الحقيقة أقل بكثير من الجهد الاسمي للملف وذلك من اجل ضمان سرعة عمل المرحل. ان الفرق بين الملف الذي يغذى في حالة (AC) عنه في حالة (DC) [illegible] [illegible] [illegible] المغناطيسي من خلالها وبالتالي يبقى الملف في حالة الغلق عند اللحظة التي تكون فيها موجه الجهد (0 V).

تتوفر المرحلات باحجام وتراكيب تماسات وقدرات مختلفة، وبعض هذه المرحلات الصغيرة يوضع على سوكة (IC)، ويزود مباشرة بالقدرة من بوابة منطق رقمية. غالبا مايطلق على مرحل القدرة الكنتاكتور (Contactor) والذي يستخدم لوصل التيار العالى فوق (50 A)الى الالآت الكهربائية. الشكل (٨-١١) يبين عدد من المرحلات المختلفة. من الضروري معرفة ان للمرحل عمر تشغيلي، أولاً: بسبب ان المرحل عباره عن جهاز ميكانيكي الاجزاء المتحركة فية تبلى او تستهلك ثانيا: ان التماسات تحفر بسبب القوس الكهربائي. ان العمر التشغيلي للتماسات يعتمد على مقدار التيار الكهربائي المار فيها. على سبيل المثال العمر

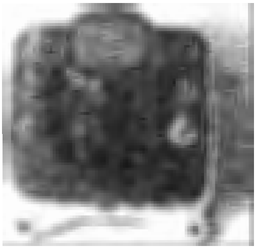
التشغيلي لملف ما (٩) مليون مرة عند تيار(1.5 A) ولكن يكون العمر التشغيلي له (٢) مليون مرة عند تيار(3A). كمايعتمد المرحل على نوع الحمل المراد الـــتحكم به، فعلى سبيل المثال الاحمال الحثية مثل المحركات الكهربائية تتسبب في ظهــور قوس كهربائي أكبر من الاحمال المقاومية مثل الانارة و التسخين.



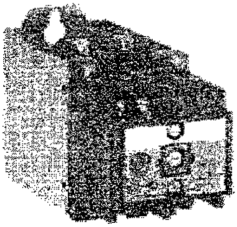
(a) General purpose relay



(b) General purpose relay



(c) High current relay



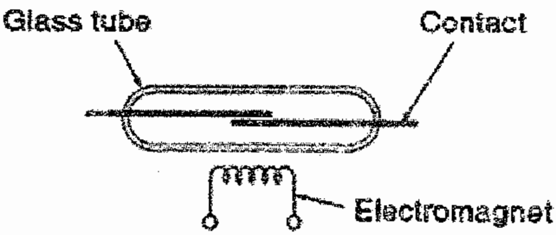
(d) Industrial relay

الشكل (٨-١١)

بعض انواع من المرحلات المختلفة

٨-١-٢-٢- مرحل القصبة Reed Relay

مرحل القصبة مرحل فريداً بسبب صغر قصبة التماس والمغلفة بانبوب زجاجي صغير معزول ومفرغ او معبأ بغار النيتروجين. التماس يُفعَّل بوساطة مجال مغناطيسي كما يظهر في الشكل (٨-١٢). التماس أما أن يكون جافا اومبللا بالزئبق، التماس المبلل بالزئبق هو تماس زئبقي رفيع يملأ الأسطح الغير منتظمة، مما يجعل هنالك مساحة توصيل كبيرة، ويقلل التحريض لانتاج القوس الكهربائي. ان للمرحل عمرتشغيلي طويل وفولتية ملفه منخفضة. وهوحصين ضد ملوثات البيئة المحيطة كما ان قدرته منخفضة وحساس للاهتزازات.

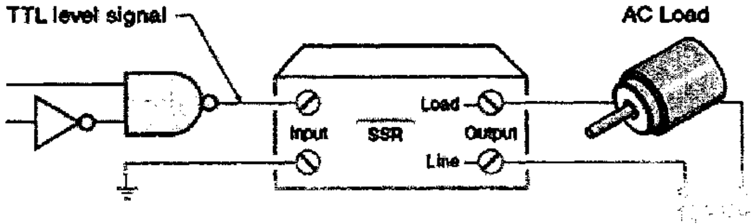


الشكل (٨-١٢)
تركيب مرحل القصبة

٨-١-٢-٣- مرحل الحالة الثابتة Solid-State Relay (SSR)

لقد حل المرحل ذو الحالة الثابتة (SSR) مكان المرحل الكهروميكانيكي (Electromechanical Relay) (EMR) في العديد من التطبيقات. حيث يستخدم بشكل خاص في فصل التغذية الكهربائية عن الاحمال مثل المحركات الكهربائية. مرحل الحالة الثابتة (SSR): عبارة عن صندوق بنفس حجم المرحل الكهروميكانيكي له أربع أطراف توصيل كهربائية كما يظهر في الشكل (٨-١٣)،

طرفا المدخل هي بمثابة الملف في المرحل الكهروميكانيكي والطرفان الآخران يشابهان تماسات التوصيل في المرحل (EMR) وفي العاده تكون هذه الاطراف مفتوحة في الحالة الطبيعية (اي لايوجد اشارة على اطراف المدخل).

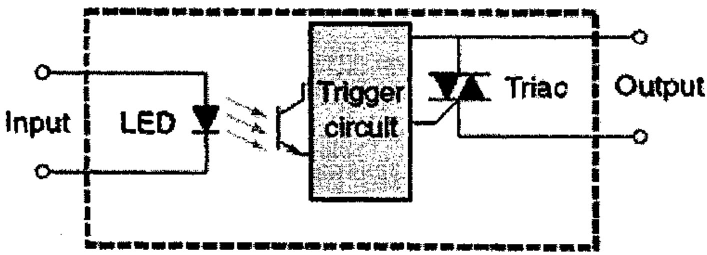


[illegible]

النوع ($5Vdc$) ليقاد من دائرة (TTL) منطقية رقمية.

بالنظر الى طرفي المخرج في المرحل (SSR) فإن الحمل يوصل مع المرحل على التوالي بمصدر قدرة ($120Vac$) او($240Vac$). التيار يصل الى مدى اعلى من $50\,A$. للعديد من المرحلات (SSR) خاصية تدعى فولتية التوصيل الصفرية zero-voltage-switching : تيار الخط يكون في حالة وصل عند الزمن الذي تكون فية فولتية الموجة المترددة (AC) صفر. وهذا يؤدي الى التخلص من الزيادة الحادة في زمن فولتية المخرج كما يؤدي الى تقليل الازعاج الناتج عن تشويش المجالات الكهرومغناطيسية.

الشكل (٨-١٤) يبين المخطط الصندوق للتركيب الداخلي للمرحل (SSR). الفولتية المطبقة على المدخل(اشارة التحكم) تعمل على تشغيل الديود الضوئي، الضوء المنبعث من الديود يعمل على قدح الترانزستور والذي بدورة يعمل على قدح الترياك مؤديا الى توصيل القدرة للحمل.



الشكل(٨-١٤)

دائرة المرحل SSR

الديود الضوئي يعمل كهربائيا على عزل دائرة المخرج عن المدخل وهذا الشيء مهم من ناحيتان:-

اولاً : يسمح بوجود ارضي لخط التحكم منفصل عن خط القدرة.

ثانياً: يمنع الارتفاع في الفولتيات المسمارية من التأثير على الاجزاء الحساسة في الدائرة الالكترونية.

ان لمرحل الحالة الثابتة (SSR) العديد من المميزات عن المرحل الكهروميكانيكي (EMR):-

١- لايحتوي على اجزاء متحركة يمكن ان تبلى او عرضة الى الاهتزازات او الصدمات بسبب التركيب الداخلي الالكتروني.

٢- يمكن ان يقاد باشارة تحكم بجهد منخفض بغض النظر عــن تيــار المخــرج او الحمل.

اماسيئات (SSR):-

١- يمكن ان يتم قدح خاطيء له من اشارة تشويش كهربائية.

٢- مقاومة دائرة المخرج لا تكون صفر حتى عندما يكون المرحــل فــي حالــة توصيل وبالتالى هنالك هبوط في الجهد وضياعات على المرحل وعندمايكون في حالةعدم توصيل هنالك تيار تسريب بستوى قاتل.

٣- تماسات التوصيل تكون محدودة ، لذلك فانه لايستخدم في كل التطبيقات .

٨-١-٢-٤- مرحل الحالة الثابتة الهجين Hybrid Solid-State Relay

مشابه لمرحل الحالة الثابتة (SSR)، الا انه يأخذ فولتية منخفضة، ومرحل القصبة (Reed Relay) يعمل بشكل سريع على قدح الترياك بدلا عن الديود الضوئي، حيث استخدام مرحل القصبة يعطي عملية عزل كهربائية جيدة واداء فــي بعــض المواقع افضل من (SSR).

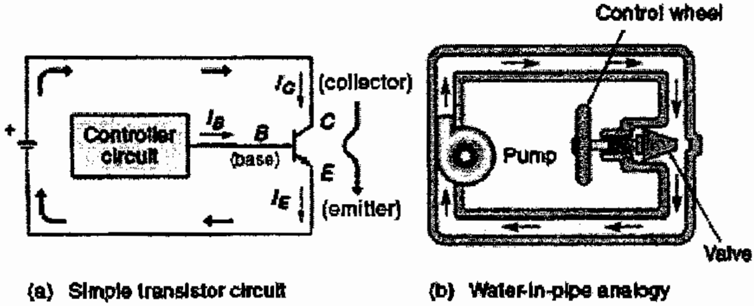
٨-٢- ترانزستورات القدرة Power Transistors

ترانزستورات القدرة تستخدم بشكل واسع في دوائر التحكم كمفتاح أو مكبر قدرة. إن ترانزستور القدرة أساساً مشابة تماماً للترانزستور العادي صغير الإشارة ولكن يصمم لحمل تيار أعلى. وعندما نتكلم عن التيار نعني التيــار الاصــطلاحي وهو ذلك التيار الذي يمر من الطرف الموجب للبطارية الى طرفها السالب وذلــك بعكس حركة الالكترونات .

٨-٢-١- ترانزستور ثنائي القطب Bipolar Junction Transistor (BJT)

ترانزستور ثنائي القطب له ثلاث أطراف ويعمل على تيار كهربائي كبيــر مثل الصمام الذي يتحكم بتيار الماء في الانبوب كما يبين ذلــك الــشكل (٨-١٣).

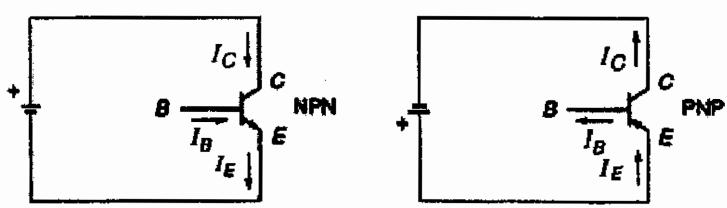
الشكل (٨-١٣-a) يبين ترانزستورله ثلاث اطراف: القاعدة (Base)، والباعث (Emitter)، والجامع (Collector) موصول في دائرة بسيطة مع تيار افتراضي داخلا الى الجامع (C) وخارجا من الباعث (E). وظيفياً مماثل للنظام الموضح في الشكل (٨-١٣-b) ان السائل يضخ من خلال الصمام المفتوح جزئيا وينظم تدفق السائل بواسطة فتح او غلق الصمام.



الشكل (٨-١٣)

دائرة ترانزستور بسيطة مع مايماثلها في النظام الهيدورليكي

وفي دائرة الترانزستور ينظم سريان التيار (I_C) بواسطة تعديل تيار القاعدة (I_B) المسيطر عليه، كلما زدنا التيار (I_B) زاد التيار (I_C)، في الحقيقة ان تيارالجامع اكبر من تيار القاعدة بمئة مرة او اكثر.



الشكل (٨-١٤)

انواع الترانزستورات NPN و PNP

هنالك نوعان أساسيان من الترانزستورات: (NPN) و (PNP) كلاهما مصنوع من ثلاث طبقات من مادة شبه موصلة كما في الشكل (٨-١٤)، الفرق الوظيفي الوحيد بينهما هو إتجاه سريان التيار، حيث يشير السهم على رأس الباعث الى إتجاه التيار الاصطلاحي. النوع (NPN) اكثر شيوعًا وهو ما سنتناوله بالشرح فيما بعد.

أساسيات عمل الترانزستور يمكن ان تلخص بالبيانات التالية:

١- عند حالة التشغيل الاساسية ، (I_C) يكون بضع اضعاف من تيار القاعدة (I_B) وبعبارة أخرى، الترانزستور مضخم للتيار. تيارالكسب الامامي (h_{FE}) او (β) والذي يتفاوت تبعا لنوع الترانزستور.

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

حيث أن h_{FE} : تيار الكسب لامامي I_C : تيار الجامع

I_B : تيار القاعدة

٢- داخل الترانزستور، يضم تيار القاعدة الصغير الى تيار الجامع ليعطينا تيار الباعث (I_E).

$$I_E = I_C + I_B$$

وبما ان تيار الجامع اكبر بكثير من تيار القاعدة فان معادلة تيار الباعث:

$$I_E \approx I_C$$

٣- يبدد الترانزستور القدرة في اي وقت يسري تيار خلاله ، وتكون قيمة القدرة المبددة من العلاقة:-

$$P_D = I_C \times V_E$$

P_D : القدرة المبددة في الترانزستور

V_{CE}: الجهد بين الجامع والباعث

مثال : كسب التيار لترانزستور القدرة $(h_{FE} = 60)$، يعمل بتيار حمل $(I_C = 3\ A)$، جد تيار القاعدة.

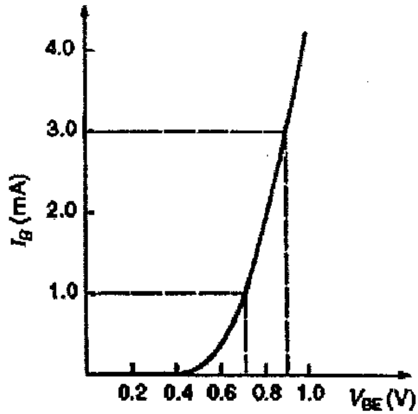
الحل :

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_B = \frac{3\ A}{50} = 60\ mA$$

كما ذكرنا سابقا فان الترانزستور يعمل على تكبير تيار القاعدة. وصلة الباعث والقاعدة تعمل كما لو ان هنالك أنحياز ديود امامي ($0.7V$ للترانزستور السلكوني و $0.3V$ للجرمانيوم).

عند رفع جهد القاعدة الى جهد الانحياز فإن اي زيادة فوق ذلك سوف تؤدي الى مرور تيار القاعدة، كما وهو واضح في الرسم البياني في الشكل (٨-١٥).



الشكل (٨-١٥)

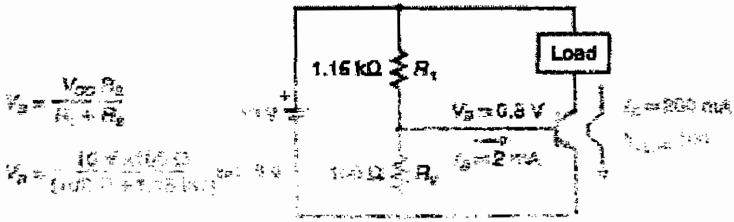
منحنى العلاقة بين الجهد (V_{CE}) والتيار (I_B) للترانزستور

إن الطريقة الأكثر شيوعا لتأمين جهد الانحيار هو باستخدام مقاومة تجزئة الجهد كما يوضح ذلك الشكل (٨-١٦)، حيث ان مقـومتي تجزئـة الجهـد (R_1)

و (R_2) تؤمن جهد انحياز مقداره $(0.8V)$ (باهمال اي مـؤثرات للجهـد). مـن المنحنى في الشكل (٨-١٥) نرى ان جهد مقداره$(0.8V)$ يرفع تيار القاعدة الـى $(2\ mA)$.

مثال: من الشكل (٨-١٦)، احسب تيار الجامع (I_C) إذا كان كسب الترانزسـتور $(h_{FE} = 100)$.

الحل: من المنحنى فإن تيار القاعدة عند (0.8 V)يساوي (2mA).



الشكل (٨-١٦)

طريقة تأمين جهد الانحياز للترانزستور باستخدام مقاومة التجزئة

ويمكن حساب تيار الجامع من المعادلة:

$$I_C = h_{FE} \times I_B = 100 \times 2mA = 200\,mA$$

بما أن تيار الجامع على التوالي مع الحمل فان تياراً مقدارة (200mA) سوف يمر من خلال الترانزستور والحمل.

٨-٣- مجموعة أشباه الموصلات التي تدعى الثايروستورات والتي تضم الثايروستور والترياك

مقدمة

الثايروستور الذي يمكن تشغيله وأطفائة خلال بضعة أجزاء من الثانية يمكن أن يستخدم كمفتاح سريع الاستجابة، من أجل إستبدال العناصر الميكانيكية والكهروميكانيكية في دوائر الكبح وبعض الدوائر الأخرى. يمكن إستخدام ترانزستورات القدرة كمفتاح من أجل تطبيقات التيار المستمر منخفضة القدرة.

والعنصر المستخدم كمفتاح له عدة ميزات منها:-

١- سرعة الفصل والوصل.

٢- لا يوجد فيه أجزاء متحركة.

٣- لا يوجد مفاقيد في حالة الفصل والوصل.

ويمكن تصنيف المفاتيح الاستاتية إلى صنفين أساسيين:-

١- مفاتيح أستاتية متناوبة وتقسم إلى قسمين :-

أ- أحادية الطور.

ب- ثلاثية الطور.

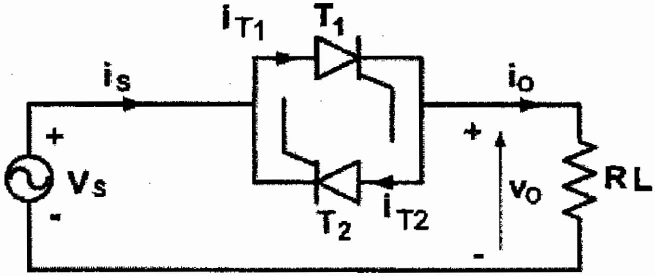
٢- مفاتيح أستاتية مستمرة.

في حالة استخدام المفاتيح الاستاتية المتناوبة فان الثايروستورات المستخدمة تكون ذات تبديل طبيعي، ويتم تحديد سرعة الفصل بواسطة تردد مصدر الجهد وزمن الفصل للثايروستور. اما في حالة استخدام مفاتيح التيار المباشر فإن عملية التبديل تتم بالطرق القسرية، وسرعة الفصل تعتمد على دائرة التبديل القسري وزمن الإطفاء للثايروستور.

٨-٣-١- المفاتيح الأستاتية المتناوبة أحادية الطور

Single Phase AC Switches

الشكل (٨-١٧) دائرة مفتاح استاتي متناوب أحادى الطور.



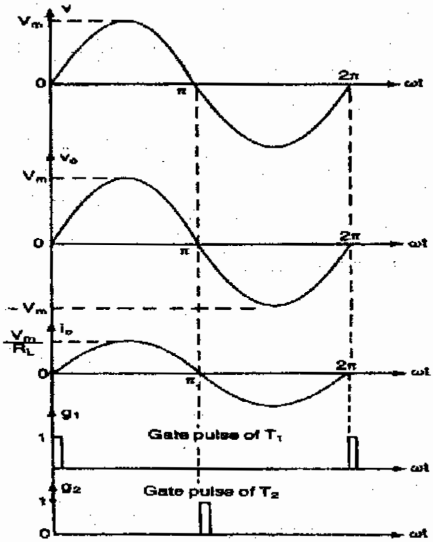
الشكل (٨-١٧)

دائرة مفتاح استاتي متناوب أحادى الطور

مبدأ العمل:-

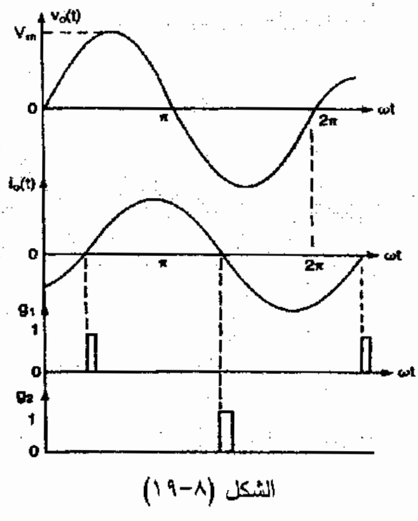
يتم قدح الثايروستور الأول (T_1) عند زاوية قدح$(\omega t = 0)$، ويتم قدح الثايروستور (T_2) عند زاوية قدح $(\omega t = \pi)$. وبالتالي فان شكل موجة الخرج هو نفس شكل موجة الدخل. وتعمل الثايروستورات كمفاتيح وتكون عملية التبديل عملية تبديل طبيعية. وشكل الموجة مبين في الشكل (٨-١٨).

إذا كان الحمل حثيا فإنه يكون هنالك تأخير في قدح كل من الثايروستورين، ويعتمد ذلك على زاوية فرق الطور للحمل. كما هو مبين في الشكل (٨-١٩). وبالتالي فإن الثايروستور (T_1) سوف يوصل عندما يمر الجزء الموجب للموجة في نقطة الصفر. والثايروستور T_2 سوف يوصل عندما يمر الجزء السالب للموجة في نقطة الصفر . ويمكن استخدام الترياك بدلا من الثايروستورين كما هو مبين في الشكل (٨-٢٠).



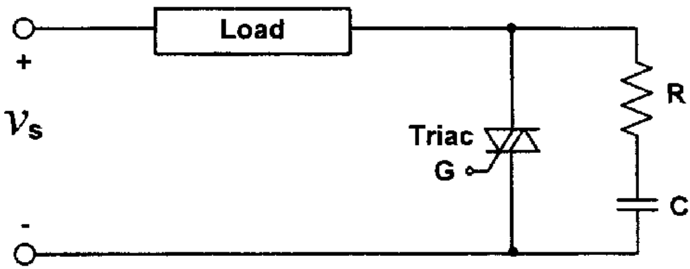
الشكل (٨-١٨)

شكل الموجات الداخلة والخارجة في حالة الحمل المادي



الشكل (٨-١٩)

شكل الموجات الداخلة والخارجة في حالة الحمل الحثي



الشكل (٨-٢٠)

دائرة تبين استخدام الترياك بدلا من الثايروستورين

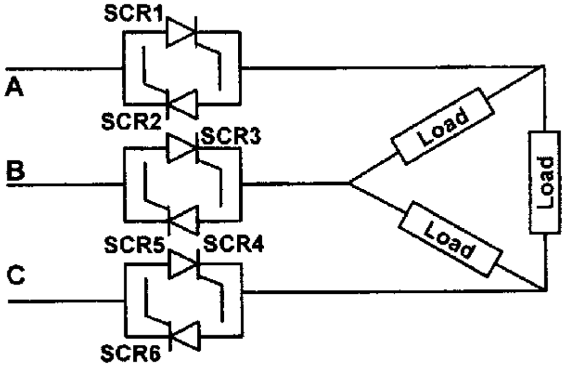
٨-٣-٢- المفاتيح الاستاتية المتناوبة ثلاثية الطور

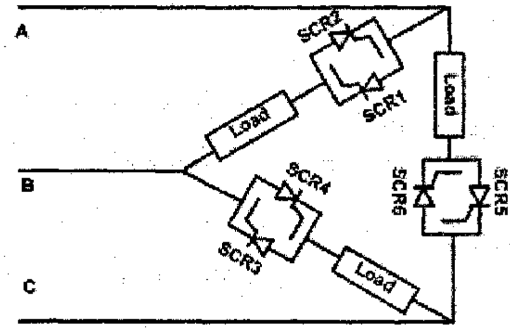
Three Phase AC Switches

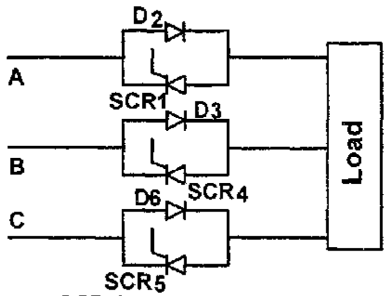
مبدأ العمل:-

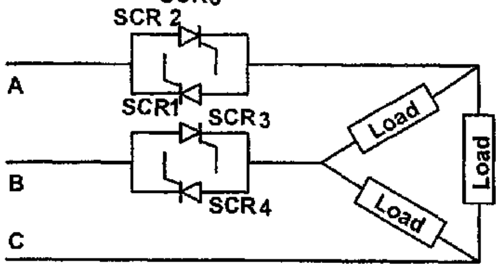
مفاتيح التيار المتناوب أحادية الطور يمكن تحويلها إلى مفاتيح ثلاثية الطور بوصل هذه المفاتيح مع بعضها البعض.

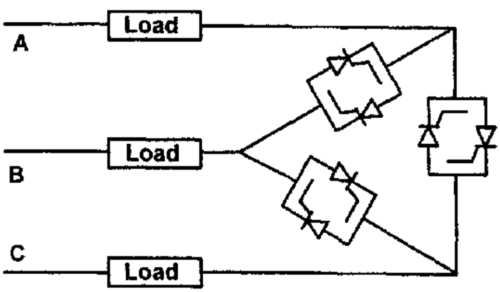
ويبين الشكل (٨-٢١) دائرة مفاتيح استاتية ثلاثية الطور مختلفة التوصيل، ويمكن أن يكون الحمل موصولا بشكل نجمي أو مثلثي.

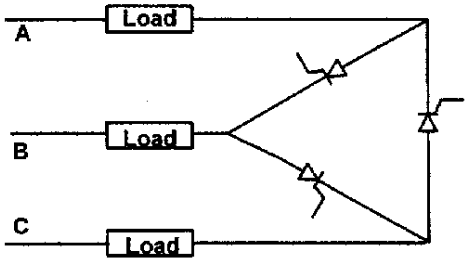



A
B
C
SCR2
SCR1
Load
Load
SCR4
SCR3
Load
SCR6
SCR5


D2
A
SCR1
D3
B
SCR4
D6
C
SCR5
Load


SCR 2
A
SCR1
SCR3
B
SCR4
C
Load
Load
Load


Load
A
Load
B
C
Load



الشكل (٨-٢١)

مفاتيح أستاتية موصولة بطرق مختلفة

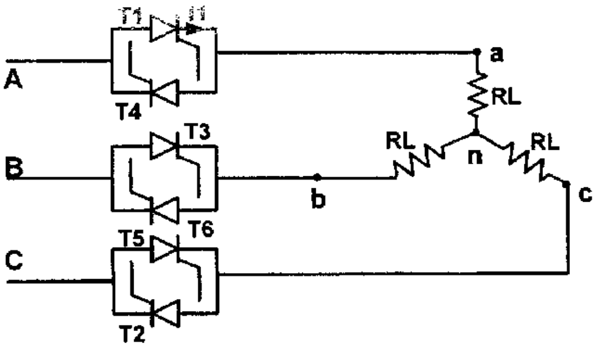
فترات التوصيل لكل ثايروستور هي كما يلي:-

$T_6 = 300^\circ$ $T_1 = 0$

$T = 240^\circ$

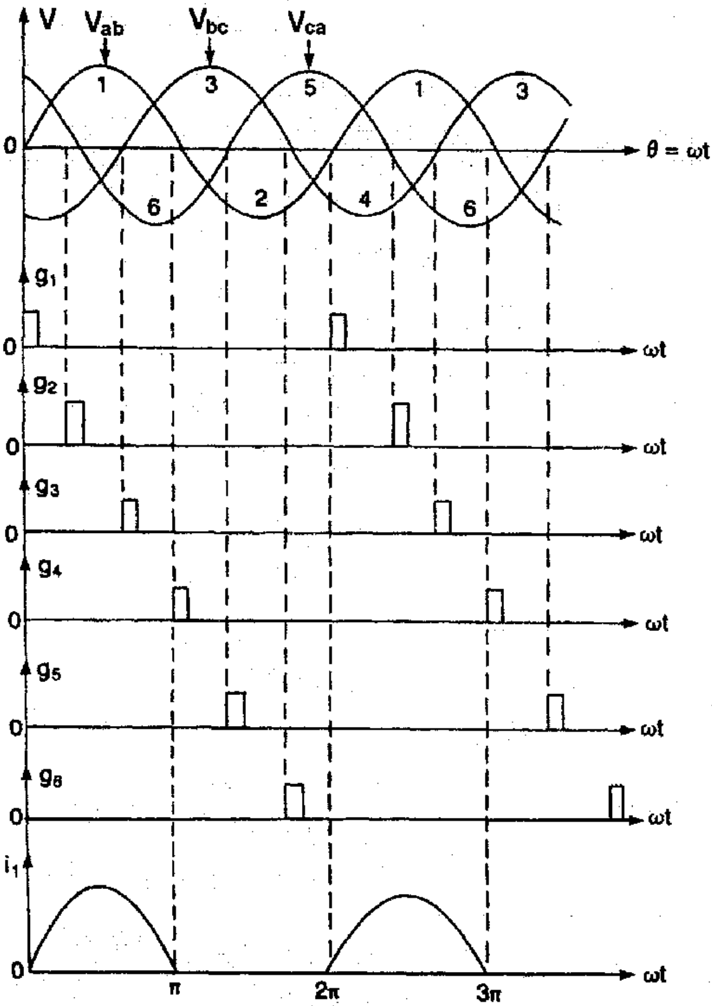
$T_2 = 60^\circ$

[illegible]



الشكل (٨-٢٢)

أحد المفاتيح الستاتيكية ثلاثية الاطوار



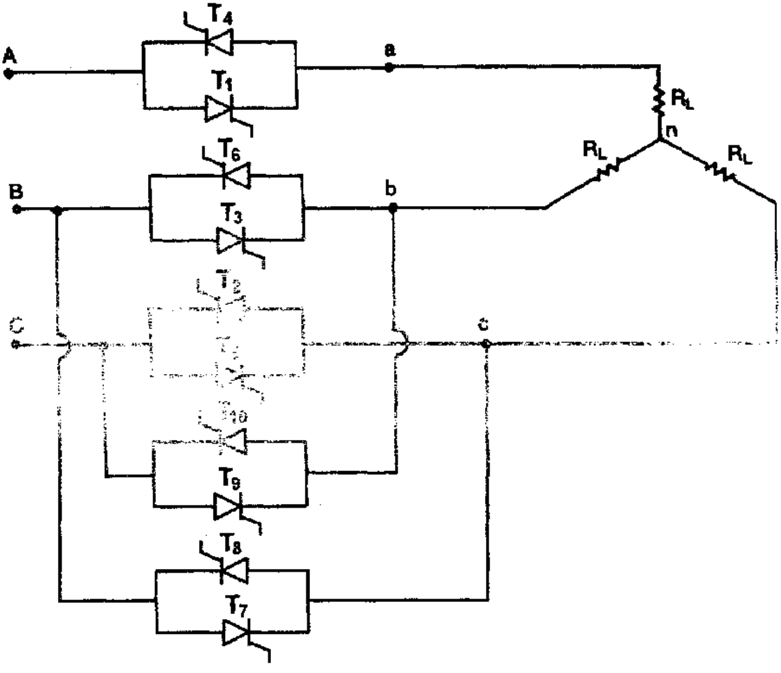
الشكل (٨-٢٣)

شكل الموجة على الحمل للمفاتيح الأستاتية ثلاثية الاطوار

٨-٣-٣- المفاتيح ثلاثية الأطوار العكسية

Three-Phase Reversing Switches

المفاتيح ثلاثية الأطوار العكسية يمكن الحصول عليها بإضافة مفتاحين أحاديين الطور إلى مفتاح ثلاثي الطور. كما هو مبين في الشكل (٨-٢٤).



الشكل (٨-٢٤)

مفتاح ثلاثية الطور عكسي

مبدأ العمل:-

خلال حالات العمل الطبيعية يتم إشعال الثايروستورات من (T_1) إلى (T_6) ويتم إطفاء الثايروستورات من (T_7) إلى (T_{10}) بإشارة بوابة متطابقة. وبالتالي فإن الخط (A) يغذي الطرف (a). والخط (B) يغذي الطرف (b). والخط (C) يغذي الطرف (c).

في حالة عكس الأطوار فإن الثايروستورات (T_2,T_3,T_5,T_6) يتم إطفائها بواسطة نبضة متطابقة، ويتم إشعال الثايروستورات من (T_7) إلى (T_{10}). وفي هذه الحالة فان الخط (B) يغذي الطرف (c)، بينما الخط (C) يغذي الطرف (b). مما يؤدي إلى وجود عكس في الأطوار على الحمل الموصول مع المفاتيح.

ومن اجل الحصول على عكس في الأطوار يجب أن تكون جميع العناصر المستخدمة ثايروستورات، ولا يمكن استخدام الديودات في هذه الحالة. لانة عند عكس الأطوار فإن ذلك سوف يؤدي إلى وجود دائرة قصر.

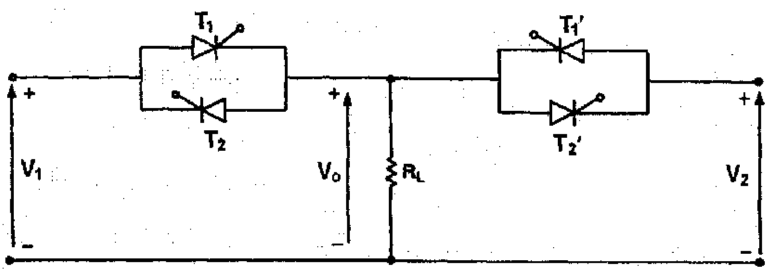
استخدامات مفاتيح التيار المتناوب:-

١- تستخدم مفاتيح التيار المتناوب كمصدر تحويل من مصدر جهد إلى آخر:- في بعض التطبيقات الكهربائية يتطلب في بعض الأحيان تحويل تغذية الحمل من مصدر جهد إلى مصدر جهد آخر. كمثال عدم قدرة المصدر الأساسي على تغذية الحمل وذلك نتيجة:-

١- فشل المصدر الأساسي.

٢- زيادة الجهد أو انخفاضه في المصدر الأساسي.

والشكل (٨-٢٥) يبين دائرة مصدر تحويل للجهد من مصدر أساسي إلى مصدر آخر:-

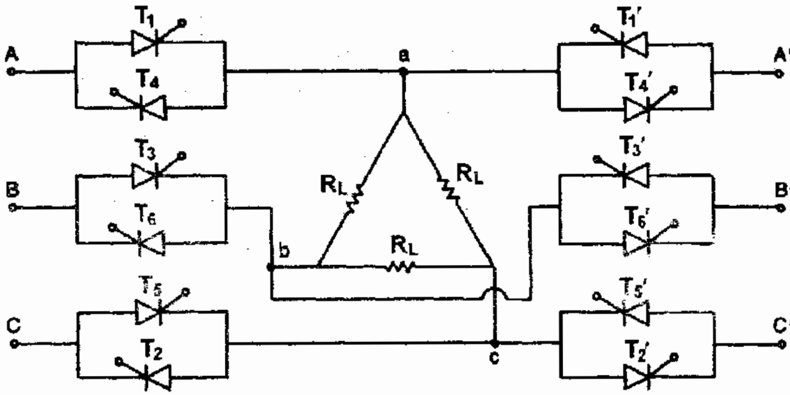


الشكل (٨-٢٥)

دائرة تحويل للجهد من مصدر الى آخر

في حالة العمل الطبيعية، إذا كانت التغذية للحمل من خلال المصدر الأساسي (V_1)، فإن الثايروستورات (T_1,T_2) سوف يعملان بينما الثايروستورات $(T_1^{'},T_2^{'})$ في حالة الفصل.

وعندما يتم تحويل المصدر إلى المصدر الثاني (V_2)، فإن الثايروستورات $(T_1^{'},T_2^{'})$ يعملان بينما يتم فصل (T_1,T_2). والشكل (٨-٢٦) يبين مصدر تحويل ثلاثي الطور.

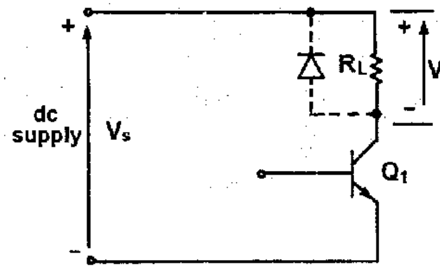


الشكل (٨-٢٦)
مصدر تحويل ثلاثي الطور

٨-٣-٤ - المفاتيح الستاتيكية المباشرة Dc Switches

في حالة المفاتيح الستاتيكية المباشرة، فإن مصدر الجهد يكون مصدر مباشر ويمكن استخدام ترانزوستور أو ثايروستور ذو زمن فصل ووصل قليل أو ثايروستور (GTO_S).

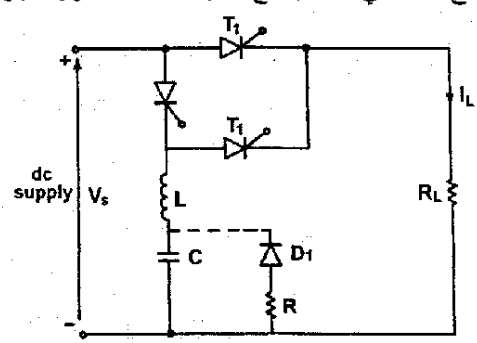
وعندما يتم قدح الثايروستور فإن اطفائة يتم باستخدام طرق التبديل القسري. والشكل (٨-٢٧) يبين دائرة مفتاح ستاتيكي مباشر أحادي القطب (Single-pole Transistor Switch) مع حمل مادي.



الشكل (٨-٢٧)

دائرة مفتاح ستاتيكي مباشر أحادى القطب

وفي حال كون الحمل حثيا، فإنه يستخدم الديود عبر الحمل من اجل حماية الترانزوستور من الحالة العابرة للجهد خلال عملية الفصل. ويمكن استخدام المفتاح وحيد القطب في تحويل القدرة من مصدر جهد إلى مصدر جهد آخر. وذلك في التطبيقات ذات القدرات العالية، فإنه يتم استخدام الثايروستورات. ويبين الشكل (٨-٢٨) دائرة مفتاح ستاتيكي مباشر مع دائرة تبديل للثايروستور.



الشكل (١٨-٢٨)

دائرة مفتاح ستاتيكي مباشر مع دائرة تبديل للثايروستور

إذا تم قدح الثايروستور (T_3)، فإن المكثف (C) سوف يشحن من خلال مصدر الجهد (V_S) و (L) و (T_3) إلى القيمة $(2V_S)$. وإذا تم توصيل (T_1) ومرر التيار الى الحمل، فإن (T_2) يستخدم من اجل إطفاء هذا الثايروستور. حيث إن توصيل الثايروستور (T_2) يؤدي إلى وجود نبضة تيار خلال المكثف (C) و (L) و (T_2) مما يؤدي إلى تقليل التيار في الثايروستور (T_1). وعندما يصل التيار خلال الثايروستور (T_2) إلى قيمة تيار الحمل، فإن التيار في الثايروستور (T_1) يصبح مساويا إلى الصفر، مما يؤدي إلى إطفاء هذا الثايروستور. والثايروستور (T_3) يطفئ بشكل طبيعي، والثايروستور (T_2) يطفئ من تلقاء نفسه.

ويضاف الديود $(\textit{Freeweeling Diode} \quad D_m)$ إذا كان الحمل حملا حثيا. ويجب تفريغ المكثف بشكل كامل خلال كل عملية فصل. ويمكن التخلص من احتمال تطبيق جهد سالب على طرفي المكثف، وذلك بوصل المقاومة مع الديود D_1. وليس من السهل إطفاء الثايروستور في حالة استخدام مصادر الجهد المستمر. ولذلك لابد من استخدام دوائر التبديل القسري.

وفي التطبيقات التي تتطلب جهد وتيار مرتفع (أي قدرة مرتفعة)، فإنه لابد من استخدام الثايروستوارت بدل الترانزوستورات في هذه الحالة. وللتخلص من استخدام دوائر التبديل القسري فانه يمكن استخدام الثايروستور (GTO_S)، حيث يتم قدح هذا النوع من الثايروستورات بتطبيق نبضة موجبة على بوابته ويتم اطفائة بتطبيق نبضة سالبة على بوابته.

استخدامات المفاتيح الستاتيكية المستمرة:-

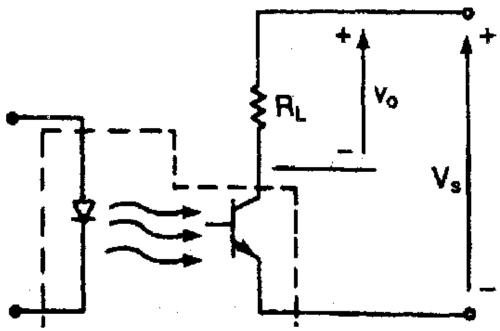
١-استخدامها في المرحلات من نوع (Soiled State Relays(SSR_S)) :- والتي تستخدم في التحكم بالقدرة المتناوبة والمستمرة .

وهي تستخدم بدل المرحلات الكهروميكانيكية في كثير من التطبيقات الكهربائية مثل التحكم بالأحمال في المحركات والمحولات.

للتطبيقات ذات الجهد المتناوب يمكن استخدام الثايروستور أو التريـاك. ولتطبيقات الجهد المستمر يمكن استخدام الترانزوستور.

وعند استخدام هذه الريلهات فانه يوجد عزل كهربائي بين دائرة التحكم ودائرة الحمل وتستخدم دوائر عزل مكونة من (Reed Relay) أو محولات أو (Opto coupler).

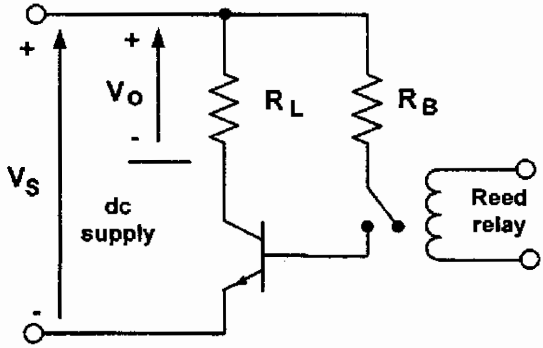
والشكل (١٨-٢٩) يبين (*SSR*) ذات تيار مباشر بدائرة عزل مؤلفة من (Opto coupler).



الشكل (٨-٢٩)

دائرة (*SSR*) ذات تيار مباشر

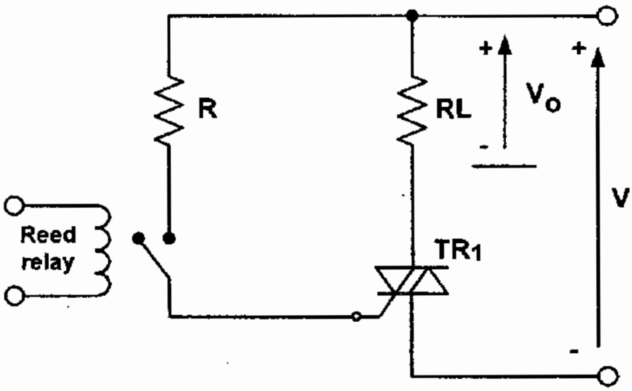
والشكل (٨-٣٠) يبين دائرة (*SSR*) ذات تيار مباشر بدائرة عزل مؤلفة من (Reed Relay).



الشكل (٨-٣٠)

دائرة عزل مؤلفة من(Reed Relay)

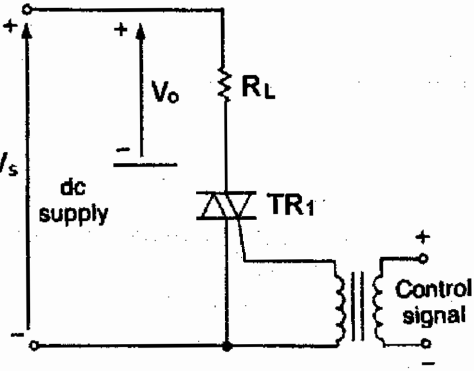
والشكل (٨-٣١) دائرة (*SSR*) ذات تيار متناوب مع دائرة عزل مؤلفة من (Reed Relay).



الشكل (١٨-٣١)

دائرة عزل مؤلفة من (Reed Relay)

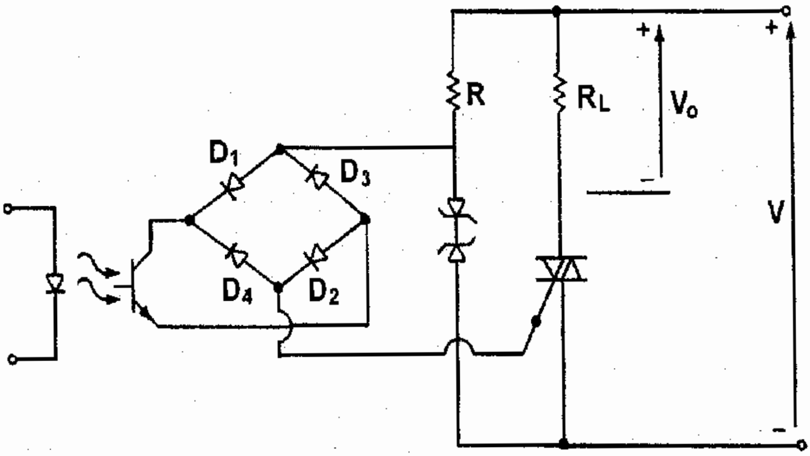
والشكل (٨-٣٢) دائرة (*SSR*) ذات تيار متناوب مع دائرة عزل مؤلفة من محول.



الشكل (٨-٣٢)

دائرة (*SSR*) ذات تيار متناوب مع دائرة عزل مؤلفة من محول

والشكل (٨-٣٣) دائرة (*SSR*) مع دائرة عزل مؤلفة من (Opto- coupler).



الشكل (١٨-٣٣)

دائرة (*SSR*) مع دائرة عزل مؤلفة ضوئي

٨-٣-٥- تصميم المفاتيح الستاتيكية

هذه المفاتيح متوفرة بشكل تجاري من اجل جهود محـــددة وتيـــارات مـــن $(1A)$ الى $(50A)$ وبجهود تصل الى $(440V)$.

إذا طلب تصميم دائرة (SSR) بمواصفات مختلفة، فإنه يتم بتحديد الجهود والتيارات للعناصر التي تتألف منها هذه الريليهات.

REFERENCES

1. Ahmed . A, (1999), *Power Electronics for Technology* , New Jersey, Prentice Hall .

2. Asghar . M.S.J , (2004), *Power Electronics* , New Delhi , Prentice-Hall .

3. Bose . B.K , (2003) , *Modern Power Electronics and Ac Drives* , Canada, Prentice Hall PTR.

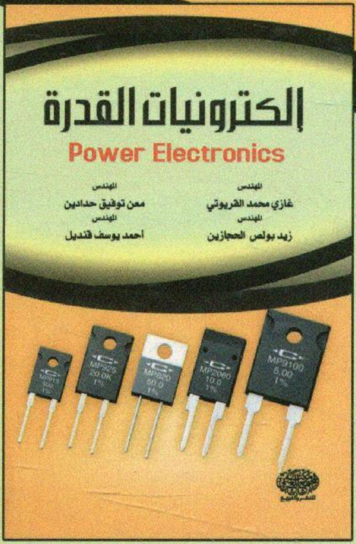
4. Dewan .S. B. & Straughen. A ,(1975), *Power Semiconductor Circuits* , Toronto , University of Toronto .

5. Finney . D , (1980) , *The Power Thyristor and its Applications* , London , McGraw-Hill .

6. Lander .C.W (1993) , *Power Electronics* , Third Edition , London , McGraw-Hill .

7. Rashid . M . H , (2004) , *Power Electronics Circuits Devices and Applications* , Third Edition , New Delhi , Prentic-Hall .

الكترونيات القدرة
Power Electronics



مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع

الأردن-عمان-وسط البلد- ش. السلط - مجمع الفحيص التجاري- تلفاكس: 2739 463 6 962+
خلوي 5651920 79 962+ ص.ب 8244 الرمز البريدي 11121 جبل الحسين الشرقي
الأردن - عمان - الجامعة الأردنية - ش. الملكة رانيا العبدالله - مقابل كلية الزراعة - مجمع زهدي حصوة التجاري
www.muj-arabi-pub.com
E-mail:Moj_ pub@hotmail.com